

**Distribución Temporal de la Fracción Respirable PM₁₀ y la Correlación con las Variables
Meteorológicas en la Universidad de la Costa, CUC.**

Ranulfo Doria Oviedo

Tatiana Porras Barrios

Universidad de la Costa, CUC

Departamento de Ingeniería Ambiental y Civil

Programa Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2017

**Distribución Temporal de la Fracción Respirable PM₁₀ y la Correlación con las Variables
Meteorológicas en la Universidad de la Costa, CUC.**

Ranulfo Doria Oviedo

Tatiana Porras Barrios

**Trabajo de Grado Presentado para Optar al Título de
Ingeniero Ambiental**

Director

MSc. Leandro Gómez Plata

Químico

Directora

PhD. Nubia Mireya Garzón

Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Universidad de la Costa, CUC

Departamento de Ingeniería Ambiental y Civil

Programa Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2017

Nota de aceptación

Tutor: Leandro Gomez Plata

Tutora: Nubia Mireya Garzón

Jurado: Dayana Agudelo

Jurado: Margarita Castillo

22 de Mayo del 2017

Primeramente, le agradezco a DIOS por permitirme cumplir uno de los sueños de mi vida, a Ranulfo e Isabel por su apoyo y constante motivación. A mis hermanos María Isabel y Francisco Javier por sus consejos y cariño, a María Luisa por apoyarme siempre. A mis compañeros de estudios en especial a mi amiga Tatiana por acompañarme en este proceso tan importante para los dos, A mis queridos maestros Leandro y Nubia por su dedicación, paciencia, disponibilidad y apoyo en la realización del presente proyecto

(CHICHI)

RANULFO DORIA OVIEDO

Gracias a mi DIOS por brindarme la posibilidad de cumplir esta meta que siempre anhele, A mis padres ELENA y PEDRO que hoy tienen fruto de su sacrificio y entrega, A mi Hermanito JEAN CARLOS que muchas veces me ha entregado su amor, apoyo y compañía porque este logro es más para ustedes que para mí; A mis primos (as) y tíos (as) que han apoyado constantemente a mi tía OLGA porque siempre he contado con su amor y su apoyo total , A mi mejor amigo JORGE ACUÑA por su ayuda incondicional a VANE y WEN por sus consejos y ayuda siempre, A ÁLVARO ANDRÉS por sus buenos deseos, A CHICHI que siempre me motivo en todos los momentos de este bonito propósito y a mis profes NUBIA y LEANDRO que nos brindaron todos sus conocimientos y ayuda en fin a todos mis amigos del semestre que se alegran por este proyecto.

TATIANA PORRAS BARRIOS

Agradecimientos

A nuestra UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo este proyecto mediante el suministro del equipo de monitoreo y materiales de laboratorio que nos fueron muy útiles.

A nuestra querida profe Eliana por ser nuestra guía inicial que nos ayudó a darle un sentido importante a este trabajo y por cada una de las enseñanzas y conocimientos que nos transmitió siempre.

A Erika auxiliar de CITA por su importante ayuda durante todo el proceso de monitoreo, y a Ana Belén auxiliar de laboratorio de ambiental por compartir los distintos momentos en las jornadas de laboratorio y en el tiempo de monitoreo, por escucharnos y ser de gran ayuda en este largo proceso de conocimiento.

A la Facultad de Ciencias Ambientales y a cada uno de nuestros profesores que contribuyeron en lo largo de nuestra formación académica como ingenieros ambientales.

A nuestros seres queridos y amigos por su motivación a seguir creciendo día a día hasta hacer de nuestro sueño una realidad.

Agradecemos inmensamente a Dios por ser nuestro principal guía en este camino para culminar de mejor manera esta gran meta.

Abreviaturas y Siglas

ANOVA	Análisis de varianza
°C	Grados Celsius
CENICAÑA	Centro de investigación de caña de azúcar
CIOH	Centro de investigación oceanográfica e hidrográfica
CO	Monóxido de carbono
DAGAM	Departamento administrativo de gestión ambiental
EPA	Environmental Protection Agency (United States)
ERA	Enfermedad respiratoria aguda
MAVDT	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
Mm	Milímetro
M/s	Metros sobre segundos
N	Norte
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
O	Oxígeno
O ₃	Ozono troposférico
OMS	Organización mundial de la salud
PBI	Producto interno bruto
PCA	Análisis de componentes principales
PM	Material particulado
PM _{2.5}	Material particulado menor a 2.5 µm
PM ₁₀	Material particulado menor a 10 µm

PPM	Partes por millón
PST	Partículas suspendidas totales
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
Q	Caudal
RLM	Regresión lineal múltiple
SINA	Sistema nacional ambiental
SLM	Humedad del suelo
SO ₂	Dióxido de nitrógeno
T	Temperatura
t	Tiempo
W	Este
μm	Micrómetro
μg/m ³	Microgramo sobre metro cubico

Glosario

Aerosol: es un conjunto de partículas microscópicas, solidas o liquidas que se encuentran en suspensión en un gas.

Aerodinámico: que tiene la forma adecuada para reducir la resistencia del aire.

Agudización: aumento de la intensidad o gravedad de una situación, enfermedad, etc.

Asma: es una enfermedad que provoca que las vías respiratorias se hinchen y se estrechen.

Atípico: que se aparta de algo conocido por sus características peculiares.

Combustión: es una reacción química en la que un elemento combustible se combina con otro comburente (generalmente oxígeno en forma de O₂ gaseosa), desprendiendo calor y produciendo un oxido; la combustión es una reacción exotérmica que produce: calor al quemar, luz al arder.

Concentración: acción de concentrar sustancias que están dispersas o que se pueden dispersar.

Correlación: correspondencia o relación recíproca entre dos o más acciones o fenómenos.

Dispersión: los gases y partículas contaminantes emitidas a la atmósfera por una chimenea (de una casa, industria o vehículo) se dispersan (es decir se alejan y diluyen) de la fuente emisora debido al arrastre del viento o el efecto de los movimientos verticales.

Distribución: es la acción y efecto de distribuir, es decir es la variación y división de partículas de diferentes tamaños.

Emisión: es la descarga directa o indirecta a la atmósfera de gases o partículas por una chimenea, ducto o punto de descarga.

Suspensión: Se aplica al estado de las partículas o cuerpos que se mantienen en el seno de un fluido durante cierto tiempo, sin depositarse.

Epidemiologia: ciencia dedicada al estudio estadístico de las categorías de personas y de los

patrones de enfermedades que estas padecen con el objetivo de determinar los acontecimientos o circunstancias que causan dichos males.

Exposición: es una función de la cantidad (o concentración) de la sustancia involucrada y el tiempo que dura esa interacción con el organismo o la gente en riesgo.

Inhalación: es el proceso por el cual entra aire desde el exterior hacia el interior de los pulmones.

Inmisión: transferencia de contaminantes de la atmósfera a un "receptor". Se entiende por inmisión la acción opuesta a la emisión. Aire inmisible es el aire respirable al nivel de la troposfera.

Inserción: es la acción de incluir una cosa en otra.

Monzón: es un viento estacional que se produce por el desplazamiento del cinturón ecuatorial.

Morbilidad: cantidad de personas que enferman en un lugar en un periodo de tiempo determinado en relación con el total de la población.

Morfología: se denomina la rama de una disciplina que se ocupa del estudio y la descripción de las formas externas de un objeto.

Nanómetro: medida de longitud que equivale a la milmillonésima parte del metro.

Radiación: emisión de radiaciones luminosas, térmicas, magnéticas o de otro tipo.

Riesgo: predicción de la frecuencia real (probabilidad) de que un químico cause daños o efectos inaceptables como resultado de exposición de organismos susceptibles o ecosistemas.

Rosa de vientos: representación, mediante un diagrama polar del porcentaje de ocurrencia del viento y su velocidad según la dirección de incidencia hacia el observador.

Smog: Contaminación atmosférica que se produce en algunas ciudades como resultado de combinación de unas determinadas circunstancias climatológicas y unos concretos

contaminantes.

Resumen

Barranquilla es considerada una ciudad importante en Colombia, por ser epicentro creciente de industrias y uno de los puertos más importantes del país, hace necesario un seguimiento a su calidad de aire por eso en el presente estudio se determinó la variación temporal de la fracción respirable PM10 y la influencia que tienen variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, precipitación y velocidad y dirección del viento en las concentraciones del PM10 en una zona representativa de la ciudad de Barranquilla. La estación de monitoreo fue ubicada en el norte centro histórico de la ciudad, exactamente dentro de la Universidad de la Costa, CUC se realizó un monitoreo atmosférico de PM10 durante los meses de abril, mayo, junio y julio cada tres días, con un muestreador Partisol 2000. Los filtros pasaron por un desecador durante 24 horas para retirar la humedad y ser pesados, para luego determinar las concentraciones de los días muestreados. Para las variables meteorológicas que se utilizaron en el estudio se acudió a la estación meteorológica del IDEAM que se encuentra en el barrio las flores de la ciudad de Barranquilla. El análisis se inició con una correlación grafica entre la concentración de material particulado y las variables meteorológicas. Estadísticamente se llevó a cabo la correlación de pearson se pudo establecer que las variables no se ajustaron a una distribución normal por lo cual se procedió a correlacionarlas mediante spearman que arrojó un porcentaje de significancia del 0,05% las variables que presentaron valores de mayor correlación fueron temperatura (-0,2599) y la humedad relativa (-0,1015) también se realizó el análisis multivariado mediante la regresión lineal múltiple que a partir del método Stepwise se determinó que la temperatura es la variable que mayor relación tiene con el PM10 de acuerdo a su p-valor de 0,071 y con un indicador de calidad de ajuste del 13,5%. El modelo de regresión lineal múltiple indicó que el aumento de 1°C

en la temperatura máxima diaria implica una disminución de $8,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de material particulado. Se llevó a cabo el análisis de componentes principales de los cuales se obtuvieron tres componentes principales el primer componente dio la explicación del 25,9 %, el segundo de 23,2 % y el tercero 18,6 % de los datos; en general la prueba de componentes principales para el presente estudio explico el 67,7% del conjunto de datos. Para el primer componente que es la concentración de PM10 arrojó una relación directa a diferencia de la humedad relativa y la temperatura las cuales evidenciaron una relación inversa, siendo la temperatura quien tuvo mayor influencia en la fracción respirable PM10. Se puede decir que las correlaciones, regresiones múltiples fue evidente que la temperatura es la variable que mayor influencia tuvo en la concentración de PM10. Este estudio tiene demostró la relación de las condiciones meteorológicas y del PM10 en la ciudad de Barranquilla, a pesar de ser una ciudad costera sin la presencia de estaciones y por un periodo de estudio corto.

Palabras Claves: Contaminación, material particulado, monitoreo atmosférico, meteorología.

Abstract

Barranquilla is considered a major city in Colombia, because it is a growing epicenter of industries and one of the most important ports in the country, it is necessary to monitor its air quality, so in the present study the temporal variation of the respirable fraction PM_{10} and the influence of meteorological variables such as temperature, relative humidity, precipitation and wind speed and direction in PM_{10} concentrations in a representative area of the city of Barranquilla. The monitoring station was located in the north of the historic center of the city, exactly inside the University of the Coast, CUC samples were taken of PM_{10} during the months of April, May, June and July every three days, with a Partisol 2000 sampler The filters were filtered through a desiccator for 24 hours to remove moisture and to be weighed, to determine the concentrations of the sampled days. For the meteorological variables that were used in the study the meteorological station of the IDEAM that is in the neighborhood the flowers of the city of Barranquilla was visited. The analysis was initiated with a graphical correlation between the concentration of particulate material and the meteorological variables. Statistically, the pearson correlation was established that the variables were not adjusted to a normal distribution, whereby they were correlated by spearman, which showed a percentage of significance of 0.05% in the variables that presented higher correlation values (-0.2599) and relative humidity (-0.1015) were also performed multivariate analysis using multiple linear regression that from the Stepwise method it was determined that temperature is the variable that has the highest relation with the PM_{10} According to its p-value of 0.071 and with an indicator of quality of adjustment of 13.5%. The multiple linear regression model indicated that the increase of 1 ° C in the maximum daily temperature implies a decrease of 8.63 $\mu g / m^3$ in the concentration of particulate material. The

principal component analysis was performed, of which three main components were obtained.

The first component gave the explanation of 25.9%, the second of 23.2% and the third 18.6% of the data; Overall the main component test for the present study explained 67.7% of the data set.

For the first component, which is the PM10 concentration, it showed a direct relationship, as opposed to the relative humidity and temperature, which showed an inverse relationship, with the temperature having the greatest influence on the PM10 respirable fraction. It can be said that correlations, multiple regressions were evident that temperature is the variable that most influence tube in PM10 concentration. This study has demonstrated the relationship of meteorological conditions and PM10 in the city of Barranquilla, despite being a coastal city without the presence of stations and for a short study period.

Key Words: Pollution, particulate matter, atmospheric monitoring, meteorology.

Contenido

Lista de Tablas y figuras.....	xviii
Introducción	1
1. Descripción del problema	3
2. Objetivos	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos específicos	5
3. Antecedentes	6
4. Marco teórico	11
4.1 Contaminación atmosférica	11
4.2 Contaminantes atmosféricos	12
4.3 Material particulado	14
4.4 Efectos del material particulado a la salud	17
4.1.1 Efectos agudos	19
4.1.2 Efectos crónicos	19
4.5 Equipos de muestreo	20
5. Marco legal	25
6. Metodología	29
6.1 Descripción zona de estudio	29
6.2 Punto de muestreo	30
6.3 Método de muestreo	31
6.3.1 Equipo	31
6.3.2 Medición de material particulado	33

6.3.3	Calculo de concentración	35
6.3.4	Medición de los parámetros meteorológicos	36
6.4	Análisis estadístico	38
7.	Resultados y discusión	40
7.1	Variables meteorológicas	40
7.1.1	Temperatura	40
7.1.2	Precipitación	43
7.1.3	Radiación solar	44
7.1.4	Humedad relativa	45
7.1.5	Velocidad del viento	46
7.1.6	Dirección del viento	48
7.2	Nivel de contaminación por PM10	52
7.3	Estadística descriptiva	54
7.3.1	Análisis descriptivo	57
7.4	Correlación entre las variables y el material particulado	59
7.4.1	Relación grafica	59
7.4.2	Correlación de spearman	65
7.5	Análisis multivariado	66
7.5.1	Regresión lineal múltiple	66
7.5.2	Análisis de componentes principales	68
8.	Conclusiones	71
	Referencias	75
	Anexos	74

Lista de Tablas y figuras

Tablas

Tabla 5.1 Marco legal de calidad de aire	25
Tabla 5.2 Resolución 610 del 2010 de calidad de aire	27
Tabla 5.3 Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire 2005	28
Tabla 6.1 Escala Beaufort de velocidades del viento	37
Tabla 7.1 Temperatura promedio horario (°C) estación meteorológica Las Flores	41
Tabla 7.2 Resumen estadístico	58
Tabla 7.3 Resultados Correlación de Spearman	65
Tabla 7.4 Resultados obtenidos del modelo stepwise para la ecuación de regresión	67
Tabla 7.5 Componentes principales	68
Tabla 7.6 Pesos de los componentes en cada variable meteorológica	69
Tabla 9.1 Bases de cálculos	74

Figuras

Figura 4.1 Fuentes naturales y antrópicas de contaminación atmosférica	11
Figura 4.2 Comparación del cabello humano con el PM ₁₀	16
Figura 4.3 Bomba personal de muestreo de are TUFF	21
Figura 4.4. Muestreador Hi-Vol para PM ₁₀	22
Figura 4.5 Muestreador de alto volumen Hi-Vol	23
Figura 4.6 Muestreador de Aire Partisol 2000i	24
Figura 6.1 Área de estudio	31
Figura. 6.2 Equipo Partisol 2000i	32
Figura 6.3 Filtros de cuarzo en el monitoreo	33

Figura 6.4 Ubicación en la azotea del bloque 9 Equipo de muestreo	34
Figura 7.1 Comportamiento mensual de la temperatura (°C)	43
Figura 7.2 Comportamiento mensual de la radiación solar $W - h/m^2$	44
Figura 7.3 Valores mensuales de humedad relativa (%)	45
Figura 7.4 Comportamiento horario de la humedad relativa (%)	46
Figura 7.5 Velocidad promedio del viento (m/s)	47
Figura 7.6 Rosa de vientos -Dirección del viento mes de abril (2015)	48
Figura 7.7 Rosa de vientos - Dirección del viento mes de Mayo (2015)	49
Figura 7.8 Rosa de vientos - Dirección del viento mes de junio (2015)	50
Figura 7.9 Rosa de vientos - Dirección del viento mes de Julio (2015)	51
Figura 7.10 PM_{10} comparación con la normativa colombiana	52
Figura 7.11 PM_{10} comparación con la Organización Mundial de la Salud (OMS)	53
Figura 7.12 Histogramas	55
Figura 7.13 Boxplot	56
Figura 7.14 Relación de Concentración diaria de PM_{10} con la Velocidad del viento	60
Figura 7.15 Relación de Concentración diaria de PM_{10} con la Dirección del viento	61
Figura 7.16 Relación de Concentración diaria de PM_{10} con la Humedad relativa del aire	62
Figura 7.17 Relación de Concentración diaria de PM_{10} con la Temperatura aire	63
Figura 7.18 Relación de Concentración diaria de PM_{10} con la Radiación global w/m^2	64

Introducción

El material particulado es el conjunto de partículas sólidas y líquidas a excepción del agua pura, presentes en suspensión en la atmósfera. Este material se puede considerar como contaminante primario o secundario, ya que las partículas primarias son emitidas directamente al ambiente, mientras que las secundarias son formadas en la atmósfera por transformaciones de las emisiones gaseosas como los óxidos de azufres, óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles. El material particulado PM puede generarse a partir de fuentes naturales, o antropogénicas catalogadas como fijas o fuentes móviles, haciendo referencia a las industrias y al parque automotor. El criterio para clasificar el PM, es el diámetro aerodinámico; designando comúnmente como $PM_{2.5}$ y PM_{10} lo que se refiere a partículas con un diámetro aerodinámico menor de $2.5\ \mu m$ y $10\ \mu m$, respectivamente (Ochoa & Jiménez, 2010);(Arciniégas, 2011).

La presencia de las partículas en la atmósfera puede generar efectos tanto en el clima, en los ecosistemas como en los seres vivos, estudios epidemiológicos afirman que las partículas que mayor relevancia tienen hacia la salud son las partículas menores a $10\ \mu m$ ya que son fácilmente respirables y penetran en los pulmones (V. Silva, 2010). Con respecto a los efectos más relevantes que el material particulado ocasiona a la salud de las personas se ven afectados los bronquios, bronquiolos y los alveolos pulmonares. Cabe resaltar que todas las partículas pueden acumularse en el sistema respiratorio y producir diversos efectos negativos en la salud, como el aumento de enfermedades respiratorias y aumentar los efectos de otras enfermedades cardiovasculares (Rodríguez, 2003).

La ciudad de Barranquilla por ser una de las principales ciudades del país y por ser un epicentro industrial y portuario muy importante por teoría se puede decir que existe una

posibilidad muy alta de contaminación (AGRO, 2013), la cual puede ser generada principalmente por las industrias y por los vehículos que se encuentran circulando constantemente en la ciudad pero a falta de estudios de calidad de aire en barranquilla no se tiene el soporte de investigaciones que lo confirmen (MinAmbiente, 2012).

Para efectos de la problemática que se está presentando en la ciudad de Barranquilla la presente investigación llevó acabo un monitoreo en la Universidad de la Costa (CUC) de PM_{10} para determinar la distribución temporal del PM_{10} y la correlación que tiene este contaminante con las variables meteorológicas para así identificar las posibles fuentes que emiten este contaminante en el área de estudio.

1. Descripción del problema

El material particulado en el aire con diámetro aerodinámico menor a $10\text{ }\mu\text{m}$ - PM_{10} -, puede mantenerse en suspensión por periodos de tiempo significativos y penetrar el tracto respiratorio (Garrillo, 2010), convirtiéndose en una problemática de salud pública y ambiental. Según la Organización Mundial de la Salud, la exposición a las partículas supone graves riesgos para la salud en muchas ciudades de los países desarrollados y en desarrollo (OMS, 2014; Hernández et al., 2000), estableciéndose una correlación entre el nivel de contaminación y parámetros como la mortalidad o la morbilidad. El PM_{10} también puede causar daños sobre materiales que implican repercusiones económicas y daños irreparables sobre objetos y monumentos de alto valor histórico o artístico (Ballester, 2005).

En Colombia los niveles contaminación atmosférica, por partículas son más altos en las grandes zonas urbanas como Bogotá, Cali y Medellín (Hernandez, Bohorques, Pinzon, Guzman, & Yamile, 2012). La ciudad de Barranquilla es la ciudad número cuatro en número de habitantes y es considerada la metrópoli regional en el norte del país (Meisel & Perez, 2006) por su grado de desarrollo. Lo cual implica un avance acelerado que la convierte en un epicentro industrial con una gran variedad de fuentes de emisiones atmosféricas fijas y móviles. Convirtiendo al monitoreo de los contaminantes atmosféricos y el material particulado PM, en una necesidad.

La ciudad de Barranquilla, siendo una de las principales ciudades del país, distrito industrial y portuario con una proyección de crecimiento demográfico y económico alta (Fundesarrollo & Camara de comercio, 2014), desconoce la calidad del aire y los niveles de contaminación atmosférica actuales, debido a que no cuenta actualmente con un sistema de vigilancia que reporte información de calidad del aire y permita desarrollar la gestión apropiada para controlar

efectos por exposición y peligros potenciales para los residentes. Además, son pocos los reportes científicos en el área de investigación de contaminación atmosférica para la región caribe y la ciudad de Barranquilla encontrados en la literatura.

Las condiciones climáticas son fundamentales para describir el comportamiento de los contaminantes atmosféricos, ya que la dispersión y el transporte de las partículas suspendidas y de los contaminantes del aire, es dependiente de las variaciones globales y regionales del clima y de las condiciones topográficas (Garrillo, 2010). Por lo tanto, la determinación de los parámetros meteorológicos es fundamental en todo estudio de calidad de aire, ya que variables como la velocidad y dirección del viento, la humedad, la temperatura, la precipitación, la altura de mezclado, la estabilidad atmosférica, y en algunos casos la radiación solar, tienen un rol en el aumento o disminución de la contaminación atmosférica (Romero et al., 2004; MAVDT, 2010).

La presente investigación corresponde a un análisis exploratorio con fines diagnósticos sobre los niveles de partículas suspendidas PM_{10} , en la ciudad de Barranquilla y la influencia que tiene las variables meteorológicas sobre los mismos, pretende dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las variables meteorológicas con mayor influencia en la concentración y distribución temporal de la fracción respirable del material particulado PM_{10} , en la localidad norte centro histórico de la ciudad de Barranquilla?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar la variación temporal de la fracción respirable PM_{10} y la correlación con las variables meteorológicas en un punto representativo del norte-centro histórico de Barranquilla

2.2 Objetivos específicos

Establecer el grado de contaminación con respecto a la concentración de la fracción respirable PM_{10} medida en un punto representativo de la ciudad, empleando un muestreador Partisol 2000i.

Evaluar la influencia de las variables meteorológicas en la variación temporal de la fracción respirable PM_{10} durante el periodo de estudio.

3. Antecedentes

El deterioro de la calidad del aire tiene un alto impacto en la sociedad a través de sus efectos adversos en la salud pública y el ecosistema. La situación de la calidad del aire en un área está altamente determinada por la concentración de las emisiones y por los parámetros meteorológicos. La distribución de los contaminantes atmosféricos del aire depende considerablemente de los parámetros meteorológicos, ya que estos controlan las emisiones naturales, el transporte, la química y la deposición de los mismos (Mues et al., 2012). Esta dependencia ha sido ampliamente estudiada a nivel internacional.

Estudios como el realizado tanto en el interior como exterior de doce escuelas de la franja de Gaza durante tres estaciones presentaron concentraciones promedio de PM_{10} de 349,5 ($\pm 196,6$) mg/m^3 en el interior y exterior de 149,5 ($\pm 98,4$) mg/m^3 para todas las escuelas durante el periodo de estudio (Elbayoumi et al., 2014) demostraron mediante la correlación bivalente que existe una correlación altamente positiva entre las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidas en el interior y exterior. La correlación que obtuvieron entre las concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y las variables meteorológicas fue negativa, de lo que determinaron que cuando la temperatura interior más alta que la temperatura exterior esto hará que el aire sea forzado a salir del edificio y diluir la concentración de los contaminantes en el de interior.

En otra región del mundo, en la ciudad de Delhi - India, (Tiwari et al., 2014) desarrollaron un estudio del impacto de las variables meteorológicas en la concentración de material particulado PM_{10} para la cual se obtuvo una concentración media de 130 ± 103 para PM_{10} y $222 \pm 142 \mu g/m^3$, para $PM_{2.5}$. Mediante métodos de regresión lineal, como la correlación de Pearson los investigadores verificaron que las variables meteorológicas, tienen efecto en las partículas de

diferente diámetro aerodinámico, durante las diferentes estaciones de año; concluyendo que la altura de la capa planetaria, la velocidad del viento, temperatura, humedad del suelo y lluvia en el periodo de transición monzón de invierno, son las variables más relevantes para la ciudad.

Camacho, (2012) realizó un estudio de la variabilidad de los niveles de PM_{10} en la zona urbana de Galicia – España, encontrando que los niveles medidos durante los meses de otoño e invierno son superiores a los alcanzados en primavera y verano. Además, mediante análisis de componentes principales (PCA), los investigadores reportan que los factores influyentes en la concentración de especies químicas presentes en las partículas en suspensión son el aerosol marino, el tráfico y las diferentes industrias presentes en cada área de estudio.

En la ciudad de Córdoba -España, Sbarato et al., (2000) realizaron una comparación entre la tendencia de las partículas PM_{10} entre los años 1996 y 1997 con medias aritméticas de 69,6 y 65,7 $\mu g/m^3$, respectivamente y evidencia poca similitud entre las series de tiempo del contaminante para los dos años. (Gómez, Magallanes, & Reich, 2000) realizaron un análisis estadístico de las concentraciones de partículas totales suspendidas (PST), PM_{10} y Dióxido de Nitrógeno (NO_2) medidas en una planta siderúrgica mediante cinco (5) estaciones de muestreo, durante tres semanas, con el fin de obtener una primera apreciación acerca de la naturaleza del impacto de las distintas fuentes presentes; encontrando que tres estaciones superaron los límites permisibles de la norma de española ($150 \mu g m^{-3}$).

En Latinoamérica la variedad geográfica no permite establecer de manera general una tendencia general de la influencia de las variables meteorológicas en la concentración de material particulado PM_{10} .

Campos et al. (2007) desarrollaron un análisis temporal de la concentración, distribución de tamaño y morfología de material PM_{10} , en siete sitios de muestreo representativos en la ciudad

de Chihuahua México. Los resultados reportaron una media máxima de $59,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínima de $25,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para verano y máxima de $73,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínima de $16,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para invierno; sin cambios aparentes en la morfología de las partículas. Además, los autores indican que se debe analizar más a fondo cómo influye el clima en la concentración del contaminante.

Novoa et al. (2014) realizaron un análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos para determinar el nivel de asociación y dependencia entre contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos entre los años 2005- 2013. Corroborando la importancia que tienen las variables meteorológicas para que en una zona se presenten altas o bajas concentraciones de contaminantes atmosféricos. Los autores determinaron que existe una relación fuerte entre el ozono y la temperatura también un coeficiente de determinación del 82%, los autores señalan que parámetros meteorológicos como temperatura y humedad relativa tienen un impacto significativo en la contaminación de aire en la ciudad de México.

Figuerola et al. (2009) realizaron la aplicación del análisis discriminante en la Zona Metropolitana de Guadalajara, a los datos de PM_{10} , O_3 , CO , NO_2 y SO_2 obtenidos desde 1994 hasta 2005; donde se tomaron datos de parámetros meteorológicos como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los resultados del análisis proponen tres funciones discriminantes con las que se explica el 82.36 % de la variabilidad total de los datos. La primera función discriminante explica el 51.19% de la variabilidad y la variable que mayormente contribuye a definir la función corresponde a PM_{10} . La segunda función discriminante explica el 20.14% de la variabilidad, siendo que las variables meteorológicas que mayormente contribuyen a la definición de la función, son la temperatura-humedad y los contaminantes CO-NO_2 . Finalmente, la tercera función discriminante explica el 11.03% de la variabilidad donde se

distingue una mayor contribución de la velocidad del viento en la definición de la función.

En la Ciudad de Heredia, Costa Rica, en los años en 2005, los niveles de material particulado PM_{10} fueron determinados en dos sitios de muestreo: El edificio de la Rectoría de la Universidad Nacional y la plazoleta del Fortín, ubicada al costado norte del Parque Central de Heredia. Presentando para el punto uno, concentraciones máximas, medias, mínimas y desviación estándar de $93 \mu g/m^3 - 47,6 \mu g/m^3 - 26 \mu g/m^3 - 16,4$, respectivamente y concentraciones máximas, medias, mínimas y desviación estándar de $51 \mu g/m^3 - 30,8 \mu g/m^3 - 22 \mu g/m^3$ y $6,90 \mu g/m^3$, respectivamente para el segundo punto. Los autores correlacionan el PM_{10} y aniones de sulfato, nitrato y cloruro en los dos puntos de muestreo, de lo que infieren que la naturaleza de los orígenes de emisión y los procesos que afectan las inmisiones de contaminantes en los puntos de muestreo son los mismos. Con el análisis de componentes principales mediante el software SYSTAT, determinaron aproximadamente un 79% de varianza total se evidencio una correlación fuerte entre las concentraciones de sulfato y de nitrato presentes en las partículas PM_{10} , de lo cual señalan que la contribución viene dada por parte de fuentes antropogénicas (Herrera, Rodríguez & Solís, 2009)

En un país que presenta variedad de clima y/o pisos térmicos, con sistemas montañosos, llanuras interiores, costas y valles interandinos es aún más difícil establecer un comportamiento general de los contaminantes para todo el territorio (Eslava, 1993). En Colombia, el seguimiento a la calidad de aire en distintas ciudades, implica el monitoreo permanente de material particulado y otros contaminantes criterio por parte de las autoridades regionales, otras instituciones del sector privado y el sector público. Entre estos, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM. El informe de la calidad del aire en Colombia divulgado por este instituto, para el periodo 2001-2015 (IDEAM, 2016), indica que

existen aproximadamente 140 estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el país, siendo el PM_{10} el principal contaminante monitoreado por ser uno de los que potencialmente más afectan la salud, y presentar mayor incumplimiento de los límites máximos permisibles, en zonas de alta densidad poblacional y zonas en las que se desarrollan actividades especiales asociadas principalmente con la minería.

La investigación de Botero, Troches & Olaya (2004), es una de las pocas, adelantadas en Colombia, que utiliza herramientas estadísticas avanzadas para definir la relación entre la meteorología y los contaminantes atmosféricos. Estos investigadores propusieron un modelo de regresión logística para predecir las condiciones ambientales, bajo las cuales existe un mayor riesgo de contaminación por Partículas Suspendidas Totales (PST) en las comunas 6 y 7 de la ciudad de Cali. Los datos tomados de una estación localizada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), en el Departamento Administrativo de Gestión Ambiental (DAGMA) y en el Centro de Investigaciones sobre la Caña de Azúcar (CENICANÑA); indican que el clima es uno de los factores más influyentes en la presencia de la contaminación, por inserción en el modelo de las variables meteorológicas velocidad del viento, temperatura media, radiación solar y amplitud de temperatura. Además, establecen una predicción para el material particulado PM_{10} , sin éxitos a nivel explicativo de los casos en los que se supera la norma local de calidad del aire, pero que es un buen acercamiento y puede ser utilizado en estudios posteriores.

La importancia del estudio de la calidad de aire en las ciudades se hace evidente en las diferentes investigaciones encontradas, porque contribuyen en la toma de acciones y correcciones que permitan tener un control de contaminación, por lo cual se hace necesaria el estudio, evaluación y monitoreo de la calidad del aire de la ciudad de Barranquilla.

4. Marco teórico

4.1 Contaminación atmosférica

Es el fenómeno de acumulación o concentración de contaminantes en el aire (MAVDT, 2010). También es definida como la presencia de sustancias en la atmósfera en altas concentraciones, en un tiempo determinado, como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden ocasionar daños a la salud de las personas o al ambiente (MAVDT, 2008).

Es la presencia de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgos para la salud de las personas y de los demás seres vivos, estas molestias son presentadas de diferentes formas así como que pueden atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables (Martinez & Diaz, 2004). En la Figura 1 se pueden apreciar las principales fuentes emisoras de contaminación atmosférica que se pueden catalogar de acuerdo a la procedencia de la misma fuente contaminante, las cuales se pueden ser naturales como incendios forestales, erupciones volcánicas entre otras, o antrópicas como combustión incompleta, construcciones, minería e industrias (UNAD, 2013).



Figura 1. Fuentes emisoras de material particulado, de forma natural o antrópica, estas influyen en la contaminación atmosférica responsable de enfermedades respiratorias, por G. Herrera, S. Echeverri, D. Maya & R. Ordoñez, 2011

4.2 Contaminantes atmosféricos

El monóxido de carbono (CO) es un constituyente natural de la atmósfera y un contaminante cuando está presente por encima de las concentraciones normales de fondo. Este contaminante causa problemas en los casos de concentraciones localmente altas, debido a su toxicidad. La concentración atmosférica global de monóxido de carbono es de aproximadamente 0,1 ppm, lo que corresponde a una cantidad total en la atmósfera terrestre de aproximadamente 500 millones de toneladas métricas de CO con un tiempo medio de residencia que va de 36 a 110 días (Manahan, 2007).

El ozono troposférico (O₃) se forma a partir de otros compuestos en el aire como el NO₂. En presencia de los rayos del sol, los enlaces del NO₂ se rompen formando óxido de nitrógeno (NO) y oxígeno molecular (O) que combinados con el O₂ presente en la atmósfera, genera O₃. De aquí que los niveles de concentración del ozono dependan de la intensidad lumínica, la concentración de óxidos de nitrógeno, variables meteorológicas, entre otras (Acevedo, Bocarejo & Velásquez, 2013).

En tiempos de exposición bajos, la inhalación de ozono genera inflamación del todo el sistema respiratorio superior; es decir, las fosas nasales, la garganta y la laringe (Acevedo et al., 2013). Los niveles de exposición se reduzcan luego de haber estado en ambientes con concentraciones altas, los efectos persisten en los pulmones y principalmente, la afectación en las unidades terminales de los bronquios, Existe además evidencia que la presencia de ozono genera mutaciones en las células respiratorias resultando en generar con más probabilidad cáncer (Ramírez et al., 2013).

Las fuentes más importantes de dióxido de azufre son sobre todo la combustión de carbono que contiene azufre. Durante la combustión de carbón, el azufre orgánico en el carbón se oxida a

dióxido de azufre, como también se oxida el azufre de la pirita mineral comúnmente asociada con el carbón. Muchos factores como la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar, el transporte en la atmosfera y las características superficiales del material particulado, pueden influir en las reacciones químicas atmosféricas del dióxido de azufre, así como formar partículas sulfatadas y promover la lluvia ácida. Estas partículas pueden ser removidas de la atmósfera por deposición seca o húmeda (Manahan, 2007).

Los óxidos de nitrógeno, y especialmente el NO_2 , son promotores de otros contaminantes como el smog y la lluvia ácida. En un centro urbano, el 55% de las emisiones son del sector transporte y 22% es de generación energética. La presencia del NO_2 en la tropósfera en conjunto con radicales libres HC, hace que se forme O_3 troposférico, mientras que en la atmósfera, reacciona con el monóxido de cloro formando nitrato de cloro y liberando átomos de cloro que destruyen la capa de ozono al reaccionar con el ácido clorhídrico (Acevedo et al., 2013).

El tiempo de exposición a un contaminante determina el alcance a la salud para las personas, un tiempo de exposición corto (1 hora a 24 horas) tendrá un efecto inmediato en el aumento de problemas respiratorios incluyendo inflamación de las vías respiratorias y el aumento de síntomas para las personas que tienen asma. A largo plazo, con la formación de partículas que se ubican en todo el tracto respiratorio, pueden aumentar problemas cardiovasculares, bronquitis, asma y muerte prematura para la población más vulnerable (Ramírez et al., 2013).

4.3 Material particulado

Las partículas suspendidas en el aire pueden provenir de fuentes móviles tales como aviones, trenes, barcos y vehículos, o por fuentes fijas como las chimeneas industriales o domésticas (O’Ryan, Larraguibel, O’Ryan, & Larraguibel, 2000). Las primeras se definen como

fuentes que se desplazan de manera autónoma dentro de un área geográfica y las segundas operan en un punto fijo (Yadav, 2009). Otro tipo de fuentes son las de área, que es una determinada zona o región, urbana, suburbana o rural, que por albergar múltiples fuentes fijas de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire (MAVDT, 2010).

El material particulado que se encuentra en la atmósfera es uno de los componentes más influyentes en la contaminación del aire. Presenta una alta variabilidad en su composición química y en sus propiedades físicas, dependiente de las fuentes que lo emiten, las condiciones geográficas y climáticas de la zona de estudio y del tamaño de las partículas emitidas que pueden llegar a causar daños adversos al medio ambiente y a la salud del ser humano (WHO, 2014). La distribución y el depósito de las partículas en el sistema respiratorio humano varían sustancialmente con su tamaño. Las partículas PM_{10} ; estas se definen como aquellas partículas capaces de pasar a través de un cabezal de tamaño selectivo calibrado con una eficiencia de corte del 50 % para un diámetro aerodinámico de $10\ \mu m$ (Ruiz et al., 2014).

El material particulado también denominado como aerosol atmosférico o partículas ultrafinas (Puigserver & Carrascal, 2012), se forma a partir de partículas directamente emitidas a la atmósfera (PM primario) o aquellas que se forman a partir de procesos de conversión gas-partícula (PM secundario) (Rodríguez, 2003). Actualmente se reconocen al menos dos fracciones (Caro & Uribe, 2008) el particulado fino y el particulado grueso que son evidentes en la distribución bimodal de la masa de partículas en función del tamaño (Vargas, 2011). De acuerdo con su comportamiento aerodinámico, se clasifican en partículas sedimentables y partículas suspendidas (Saldarriaga, Echeverri, & Molina, 2004), estas últimas presentan una distribución de tamaño trimodal, incluyendo partículas de cuarzo, partículas finas y partículas ultrafinas

(Husain, Alvi, & Dutkiewicz, 2009).

El diámetro de las partículas puede ir de nanómetros a un centenar de micrómetros (Park et al., 2009), destacándose en el ámbito investigativo las Partículas Suspendidas Totales PST, quienes poseen un tamaño que va desde alrededor de $0,002\ \mu\text{m}$ a más de $100\ \mu\text{m}$ (Gomez, Saldarriaga, Correa, Posada, & Castrillon, 2008); (Sahu, Gelfand, Holland, & Mardia, 2004), las partículas PM_{10} , las cuales poseen tamaños menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$ y $\text{PM}_{2,5}$ que poseen diámetros aerodinámicos menores de $2,5\ \mu\text{m}$ (García R, Agudelo G, & Jiménez J, 2006).

El material particulado mineralógicamente y químicamente pueden contener combinación de iones inorgánicos, carbono elemental (hollín negro), varios oligoelementos, compuestos de la corteza, compuestos orgánicos, y materia biológica (Rius, Gómez, Sanfeliú, & Hernández, 2001). También se pueden presentar sulfatos formados a partir de las emisiones de dióxido de azufre (SO_2), nitratos formados a partir de las emisiones de NO_x y carbono orgánico formado a partir de las emisiones de gases (García et al., 2006)

Se denominan partículas finas aquellas con tamaños aerodinámicos menores a $2,5$ micrómetros y utilizan la nomenclatura $\text{PM}_{2,5}$ como se indica en la Figura 2 además que se muestra una comparación de los diferentes tamaños de material particulado en comparación con un cabello humano.



Figura 2. Comparación de los distintos tipos de diámetros de material particulado con el cabello humano y con la arena fina de playa medidos en micras, por J. Junco, 2016.

Las partículas atmosféricas o material particulado atmosférico, puede llegar a ser un elemento importante como factor contaminante en la atmósfera de una ciudad, una zona o sitio, pueden estar depositadas sobre el suelo, aunque generalmente flotan en el aire. El hecho de flotar en el aire se favorece principalmente debido a su tamaño ya que son muy pequeñas tanto que para hablar de su medida se utiliza el término micrómetro o micra, unidad de longitud equivalente a la millonésima parte de un metro. Estas dimensiones las hacen ser sumamente ligeras, aspecto que se combina con su forma y con diversos factores de tipo climático entre los cuales está la temperatura del ambiente y los vientos (Silva, 2010). Material Particulado PTS, 10 y 2.5 micras. (Junco, 2016).

La contaminación por material particulado es un problema que se caracteriza por su movilidad, es decir cuando no hay viento las partículas pueden permanecer en el aire durante minutos u horas en cambio mientras haya viento constante podrían mantenerse durante días o semanas viajando por diversos territorios, dependiendo de su tamaño. (Salguero, 2016). Algunas incluso pueden permanecer suspensas en el aire por años y viajar grandes extensiones a lo largo

del planeta.

4.4 Efectos del material particulado PM₁₀ a la salud

Los elementos que se encuentran presentes en el aire, los cuales los sentidos humanos no pueden ayudar a su identificación tienen una influencia nociva, por esta razón su análisis y medición se vuelve un factor importante para la salud. Las partículas suspendidas PM₁₀ constituyen el contaminante del aire urbano con mayores repercusiones sobre la salud, causando alrededor de 6.000 muertes prematuras y 7.400 casos de bronquitis crónica al año en Colombia (Caro & Uribe, 2008). Teniendo en cuenta los efectos en la salud del PM₁₀ emitidos en industrias, por el parque automotor, canteras, entre otros. El PM₁₀ es considerado como un contaminante que puede producir cáncer o gran riesgo para la salud, además el PM_{2.5} se encuentra como la segunda causa de mortalidad en el planeta (OMS, 2006), se considera un contaminante de primer grado ya que afecta el medio ambiente y a su vez el nivel de inmisión, el PM₁₀ es esta asociado a la agudización de las enfermedades respiratorias.(Fernandez & Hernandez, 2008).

Los seres humanos al inhalar se introduce aire a los pulmones, si en el aire hay partículas entraran directamente al sistema respiratorio a pesar de que el cuerpo humano cuenta con diversos mecanismos de protección natural en todo el sistema respiratorio. Un ambiente contaminado va afectando paulatinamente estas defensas, se considera que en promedio un adulto inhala entre 7200 y 8600 litros de aire cada día (Rangel, 2015).

Las fracciones respirables de material particulado (PM) al ingresar en el cuerpo, se fijan en las vías respiratorias y dependiendo del tamaño algunas alcanzan a llegar al interior de las paredes de los pulmones. Los perjuicios a la salud dependen directamente de la capacidad de

penetración de las partículas en el aparato respiratorio, tanto en el aspecto cuantitativo como cualitativo, los perjuicios serán mayores debido a que el organismo carece de suficientes mecanismos de eliminación de estos contaminantes, sobre todo cuando la permanencia en ambientes contaminados es constante (Silva, 2010).

Para el material particulado existen estudios epidemiológicos que muestran relación entre mortalidad y morbilidad, medibles como: admisiones hospitalarias, síntomas respiratorios o disminución de la función pulmonar (Díaz & Páez, 2011). El incremento de las concentraciones de este contaminante primario, aumenta el riesgo de agravar las enfermedades tanto respiratorias como cardíacas (Arciniegas & Rodríguez, 2005); presentándose mayor interés en las partículas con diámetros menores a $10\text{ }\mu\text{m}$, ya que son fácilmente respirables y penetran en los pulmones (Montoya, Zapata, & Correa, 2013). Las partículas de tamaño menor a 1 micra denominadas también como humo atmosférico llegan a depositarse en los alveolos pulmonares (Silva, 1995). Las partículas de tamaño comprendido en el intervalo $2.5 - 10\text{ }\mu\text{m}$ se depositan en la tráquea, bronquios y bronquiolos (Castañares, Figueroa, & Méndez, 2001).

El efecto de las partículas en la salud depende de su composición química, pueden producir irritación de ojos, nariz y del sistema respiratorio, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares. La contaminación por PM_{10} a corto plazo puede causar el deterioro de la función respiratoria y a largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, con el cáncer o con la muerte prematura (V. Silva, 2010). Hay otros efectos que trascienden el sistema respiratorio y producen manifestaciones en otros órganos y sistema, tales como el hígado, los riñones y el sistema nervioso, los efectos a estos órganos son producidos por los polvos de cadmio y manganeso que afectan al sistema respiratorio, los riñones y los huesos, el plomo que produce efectos en la sangre, los huesos y el sistema nervioso, el polvo de arsénico que produce

cáncer del pulmón, de nariz y de la piel, el níquel y el cromo producen cáncer nasal y de los bronquios, algunos tipos de maderas generan cáncer en cavidades nasales y de nariz y también se generan problemas en la piel como la dermatitis (Barrios, 2007).

4.4.1 Efectos agudos.

Son inmediatos y reversibles cuando finaliza la exposición al contaminante además de ser producidos por elevadas concentraciones de contaminantes por periodos cortos, generalmente corresponden a los efectos que predominan en el invierno y estos incluyen: conjuntivitis, faringitis, laringitis, bronquitis, irritación de mucosas, enfisemas, cardiopatías coronarias, crisis asmáticas y en general disminución de la capacidad del sistema de defensas (Soto, Ortiz, & Bithorn, 2015).

4.4.2 Efectos crónicos.

En algunas ocasiones los efectos crónicos tardan en manifestarse, duran indefinidamente y tienden a ser irreversibles. Se deben a exposición continua de contaminantes en distintas concentraciones por periodos largos de tiempo los cuales incrementan la bronquitis crónica obstructiva y cáncer a los pulmones (Vargas, 2011) debido a un prolongado periodo de exposición a contaminantes tóxico del aire, tales como el asbesto y berilio.

4.5 Equipos de muestreo

Existen diferentes tipos de equipos de medición de material particulado PM dependiendo la fracción según el diámetro aerodinámico de la partícula que se pretenda analizar (PM₁₀ y otros

tamaños de material fraccionado como $PM_{2.5}$ y PM_{10} , $pm_{2.5-10}$, etc) cada uno de los diferentes equipos tienen un principio en común que consiste en succionar una cantidad de aire establecida hacia una caja de muestreo donde se encuentra un filtro colector durante un tiempo generalmente de 24 horas, el filtro debe ser pesado antes y después de la medición para de esta manera evaluar la masa ganada y junto a la velocidad promedio de flujo de aire, el tiempo de muestreo y el ajuste a condiciones de referencia determinar la concentración total de las partículas (MAVDT, 2010).

Para la medición del material particulado en su fracción PM_{10} se cuenta con un conjunto de equipos de muestreo, los cuales evalúan si existen bajas o altas concentraciones de este en cierta área monitoreada, estos equipos son de diferentes características, que se diferencian con respecto a la importancia o carácter de la investigación.

Dispositivos llamados bombas personales de muestreo de aire TUFFTM como se muestra en la Figura 3 cada una de sus partes, se instalan en el cinturón de las personas, sin embargo, la porta filtro debe ser ubicado en la zona de respiración (cuello) y permite realizar mediciones directas de partículas PM_{10} , tomando muestras de aire para calcular la concentración de partículas. (Casella, 2013)



Figura 3. Descripción de las bombas personales de muestreo de aire TUFF™ mediante las cuales se puede evaluar la calidad del aire que está percibiendo cada persona, por Casella, 2013.

Otros de los equipos de muestreo más utilizados para la evaluación de material particulado, son los medidores de alto volumen PM_{10} , como el que se muestra en la Figura 4. Estos equipos miden material respirable establecido con tamaño de partícula menor que $10\mu m$; mediante el arrastre de aire ambiente a una velocidad de flujo determinada hacia una entrada, en la cual el material particulado se separa en diferentes fracciones, dentro del intervalo de tamaño de PM_{10} , se recolecta en un filtro en un periodo de muestreo específico, se determina a partir de la velocidad de flujo medida y el tiempo de muestreo. La concentración másica de PM_{10} en el aire ambiente, se calcula como la masa total de partículas recolectadas en el intervalo de tamaño de PM_{10} dividido por el volumen de aire muestreado. Para muestras de PM_{10} recolectadas a temperaturas y presiones significativamente diferentes de las condiciones de referencia, las concentraciones corregidas algunas veces difieren sustancialmente de las concentraciones reales (Arciniégas, 2011); MAVDT, 2008.

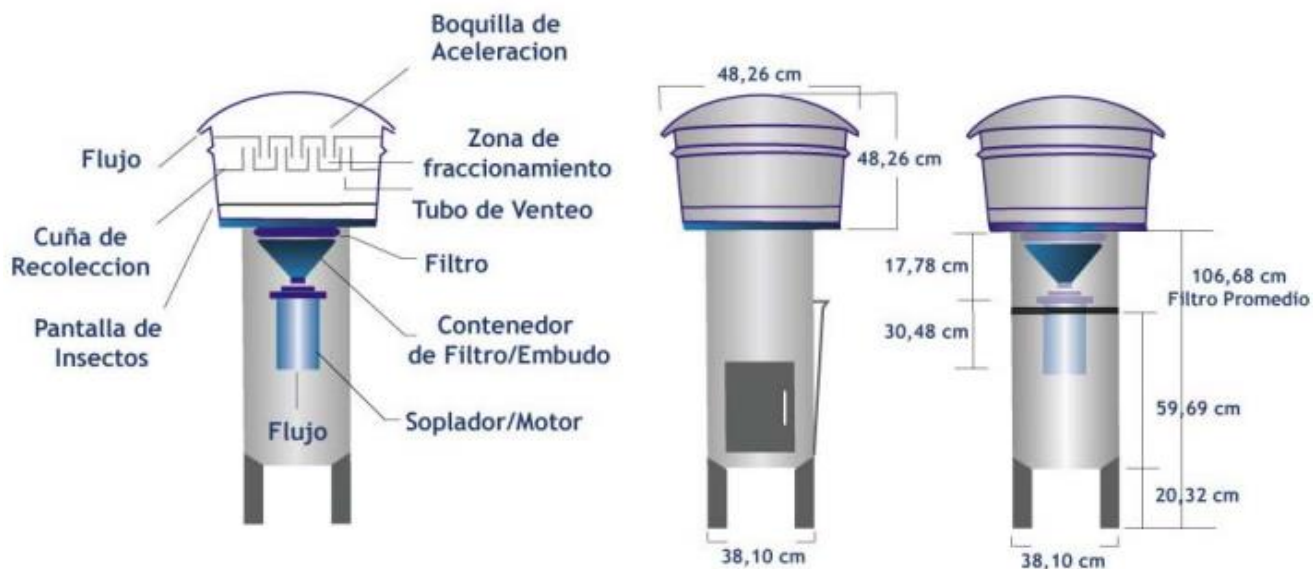


Figura 4. Descripción de las principales características equipo medidor de alto volumen PM_{10} con cada una de las características que lo hacen uno de los más utilizados en el análisis de material particulado, por Arciniégas, 2011.

Muestreador de alto volumen Hi-Vol. Para determinar la concentración másica del material particulado suspendido total (PST) en el aire ambiente, se utiliza un equipo como el que se muestra en Figura 5, que al igual que los demás equipos de medición debe ser ubicado en un lugar de medición adecuado, a través de la cubierta succiona una cantidad de aire determinada que pasa por un filtro durante un tiempo de muestreo que de manera regular es de 24 horas, este equipo de alto volumen colecta partículas entre 25-50 μm (diámetro aerodinámico), El proceso de medición no es destructivo por lo tanto puede ser usado para diferentes análisis químicos ESTRUC, 2011.

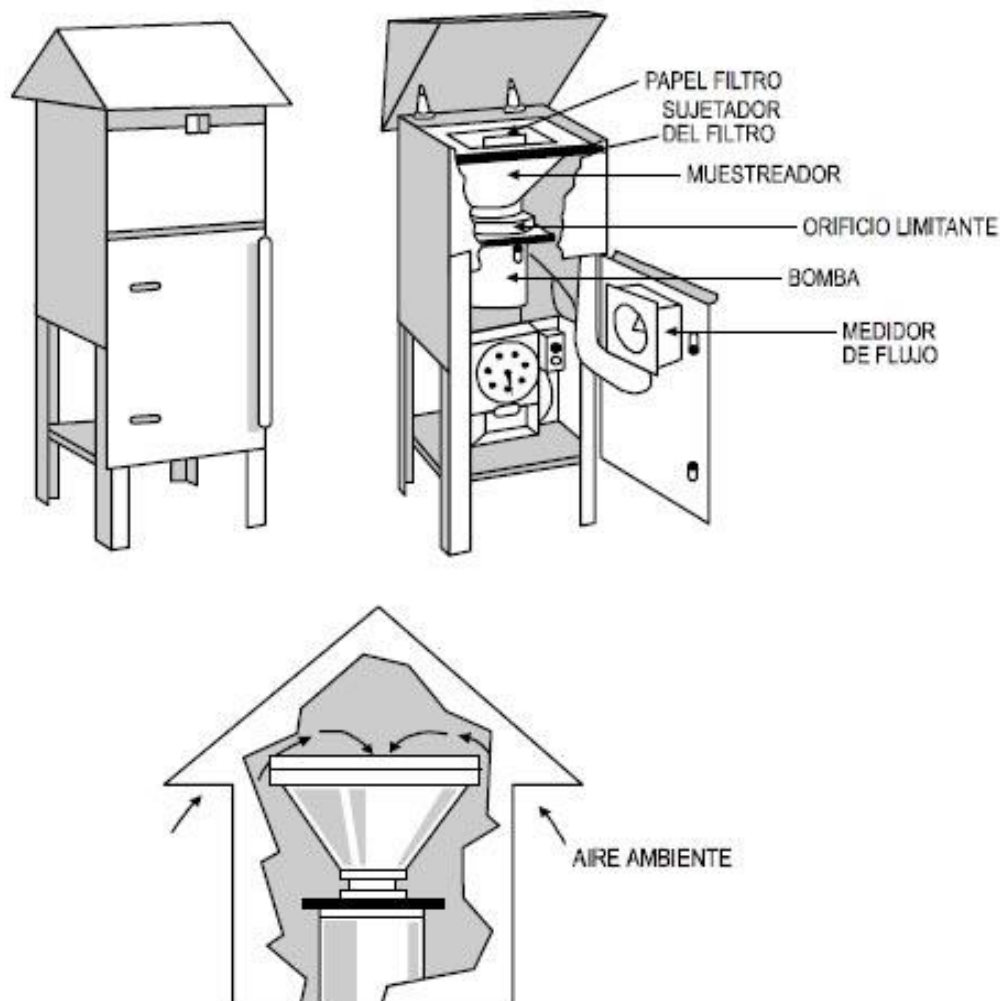


Figura 5. Descripción del Muestreador de alto volumen Hi-Vol. Para determinar la concentración másica del material particulado suspendido total (PST), por Arciniegas, 2011.

Muestreador de Aire Secuencial Partisol-Plus Modelo 2000i. El muestreador de Aire Secuencial Partisol-Plus Modelo 2000i que se muestra en la Figura 6 tiene una configuración basada en el cabezal de PM_{10} y en el impactador el cual le permite seleccionar material particulado 2,5 o cualquier otro de punto de corte deseado está seguido del filtro de 47 mm, el controlador activo de caudal y de la bomba de aspiración, estos filtros con sus portafiltros van instalados en un cargador con capacidad de hasta 16 filtros que mediante un dispositivo de cambio de filtro con accionamiento neumático permite cambiar los filtros sin la presencia del usuario; permite el

acoplamiento de distintos cabezales de corte tales como TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 . Portafiltros y Tipos de filtros de captación de muestras admite en todas las configuraciones filtros de 47 mm. la captación de muestra con el patrón $PM_{2.5}$ sólo se admite como medio de captación los filtros de Teflón con un tamaño de poro de 2 micras. Para la captación en tamaño PM_{10} USEPA permite la utilización de filtros de cuarzo Pallflex TX-40 y Teflón (Universidad industrial de santander, 2009).



Figura 6. Equipo de medición de PM_{10} es un muestreador de Aire Secuencial Partisol-Plus Modelo 2000i. El muestreador de Aire Secuencial Partisol-Plus Modelo 2000i, por Universidad industrial de santander, 2009.

5. Marco legal

En Colombia existen diferentes normas que contribuyen al control y vigilancia de la calidad de aire. En el Tabla 1 se muestra una selección de leyes y decretos que han sido utilizados para llevar a cabo el presente trabajo, como el deber que tiene el estado de brindar las garantías para cada colombiano gozar de un ambiente sano según la constitución, además es útil el código de los recursos naturales y medio ambiente entre otras que se muestran a continuación.

Tabla 1

Marco legal de calidad de aire

Norma	Descripción	Artículos Aplicables
Constitución política de Colombia 1991	Derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente.	Art 79
Decreto 2811 de 1974	El Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Art 1- Art 2- Art 3- Art 4- Art 5- Art 6- Art 7- Art 8- Art 9- Art 73- Art 74- Art75
Ley 9 de 1979	Los niveles máximos de exposición a que puedan estar sujetos los trabajadores.	Art 34- Art 41- Art 44- Art 110- Art
Ley 99 del 93	El sector público de la gestión y conservación del ambiente y los recursos naturales licencias ambientales se reordena	Art 31- Art 65

Decreto 1600 de 1994	Reglamenta parcialmente el Sistema Nacional Ambiental (SINA) en relación con los Sistemas Nacionales de Investigación Ambiental y de Información Ambiental.	Art 2
Decreto 948 del 95	Protección y control de la calidad del aire	Art 1- Art 2- Art 3- Art 4- Art 5- Art 6- Art 7- Art 8- Art 9- Art 10- Art 11- Art 12- Art 13- Art 18-
Decreto 1200 de 2004.	Se determinan los Instrumentos de Planificación Ambiental y se adoptan otras disposiciones.	Art 9- Art 11-
Resolución 532 del 2005.	Reglamenta las quemas a cielo abierto en áreas rurales en actividades agrícolas y minera	Art 3- Art 4- Art 5
Decreto 1076 DE 2015.	Expide el decreto único reglamentario del sector ambiental y desarrollo sostenible.	Titulo 5
Decreto 1076 DE 2015.	Expide el decreto único reglamentario del sector ambiental y desarrollo sostenible.	Titulo 5
Resolución 601 del 2006	Se establece la norma de calidad de aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia	Art 1
Resolución 610 del 2010	Se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmosfera.	Art 1 - Art 3 - Art 4 - Art 5.

Nota: Conjunto de Normas de control y vigilancia de calidad de aire vigentes en todo el territorio nacional colombiano. Por R. Doria & T. Porras, 2017.

La norma de Calidad del Aire en el cual se establecen los niveles máximos permisibles en el territorio colombiano, se muestra en el Tabla 2 para las partículas suspendidas totales (PST), material particulado de 10 μ (PM₁₀) y material particulado de 2.5 μ m (PM_{2.5}).

Tabla 2

Resolución 610 del 2010 de calidad de aire

Niveles máximos permisibles de partículas en el aire			
Contaminante	Unidad	Limite Max	Tiempo de exposición
PST	μg/m3	100	Anual
		300	24 horas
50		Anual	
PM ₁₀		100	24 horas
PM _{2.5}		25	Anual
		50	24 horas

Nota: Límites máximos permisibles de material particulado según la resolución 610 del 2010 según el tiempo de exposición anual o diario adaptado de MAVDT, 2010.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece valores de control de la contaminación atmosférica conocido como las Directrices Mundiales establecidas en la tabla 3 son datos más estrictos que las normas nacionales, con los cuales que pretende reducir la contaminación, pero a nivel mundial y de esta manera minimizar las muertes y enfermedades generadas por la contaminación atmosférica.

Tabla 3

Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire 2005 (OMS, 2005)

Niveles máximos permisibles de partículas en el aire			
Contaminante	Unidad	Limite Max	Tiempo de exposición
PM ₁₀	µg/m3	20	Anual
		50	24 horas
PM _{2.5}		25	Anual
		50	24 horas

Nota: Directrices o Niveles máximos permisibles de material particulado sugeridos por la OMS para reducir las enfermedades y muertes producidas por este contaminante criterio, Adaptada de OMS, 2005.

6. Metodología

6.1 Descripción zona de estudio

Barranquilla es una de las principales ciudades de Colombia, capital del departamento del atlántico ubicado en la parte norte de Colombia, su latitud y longitud son 11 ° 00 'N y 74° 50'W. Es una de las ciudades más importantes debido a que posee una ubicación privilegiada sobre la margen occidental del río Magdalena a 7,5 km de su desembocadura en el mar Caribe, cuenta con una extensión de 166 km² de los cuales 154 Km² corresponden al área urbana (Alonso, 2013). Es una ciudad que se mantiene en constante crecimiento, razón por la cual ha sido deseada por inversionistas a nivel nacional e internacional. La ciudad ha tenido crecimiento de cada uno de los sectores económicos, principalmente del sector industrial que aporta un 20 % del producto interno bruto (PIB) del departamento del Atlántico según reportes del año 2007. Esto se puede interpretar como un aporte significativo de las fuentes fijas en el departamento del Atlántico (Leonardo Bonilla, 2010).

El distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla se organiza en cinco (5) localidades Según el Acuerdo Distrital No. 006 de agosto de 2006, *TITULO I LOCALIDADES DE BARRANQUILLA*,: Localidad de Murillo Sur Occidente, Localidad de Murillo Sur Oriente, Localidad Norte-centro Histórico, Localidad metropolitana y Localidad de Río (Alcaldía de Barranquilla, 2010). La Localidad Norte Centro Histórico limita al Nororiente con el Río Magdalena; al Norte con la acera Sur de la carrera 46, autopista al Mar hasta la calle 84 siguiendo hasta la calle 82 con carrera 64 hasta empalmar con el Río Magdalena y; al Occidente con la avenida circunvalar.

6.2 Punto de muestreo

El punto de muestreo de la presente investigación se clasifica según el tipo de área como urbana, ha sido elegido por que cumple con las características principales de los criterios para la microlocalización de un sitio de vigilancia de calidad de aire (MAVDT, 2010), como son: seguridad, acceso de personal y energía eléctrica. Además, el punto de muestreo esta distanciado de carreteras, edificios y/o árboles de alturas superiores a la altura de ubicación del equipo, según el protocolo de vigilancia de calidad del aire son las especificaciones necesarias para llevar a cabo un muestreo de calidad de aire. La instalación del punto de muestreo se encuentra dentro de la localidad norte centro histórico de Barranquilla y corresponde a la azotea del bloque nueve (9) de la Universidad de la Costa, CUC; que se encuentra ubicada en la Calle 58 # 55 – 66. La georreferenciación del punto, corresponde específicamente a las coordenadas $10^{\circ}59'44.6''N$ $74^{\circ}47'26.2''W$. Se identificaron las posibles fuentes emisoras de contaminantes atmosférico tomando arbitrariamente un radio de 3 km a la redonda. Como se observa en la figura 1, la zona es mixta (industrial y residencial) además que esta intervenida por calles y carreras de mucho tráfico vehicular, que permiten considerarlo este punto, como estratégico y representativo de esta localidad de Barraquilla.

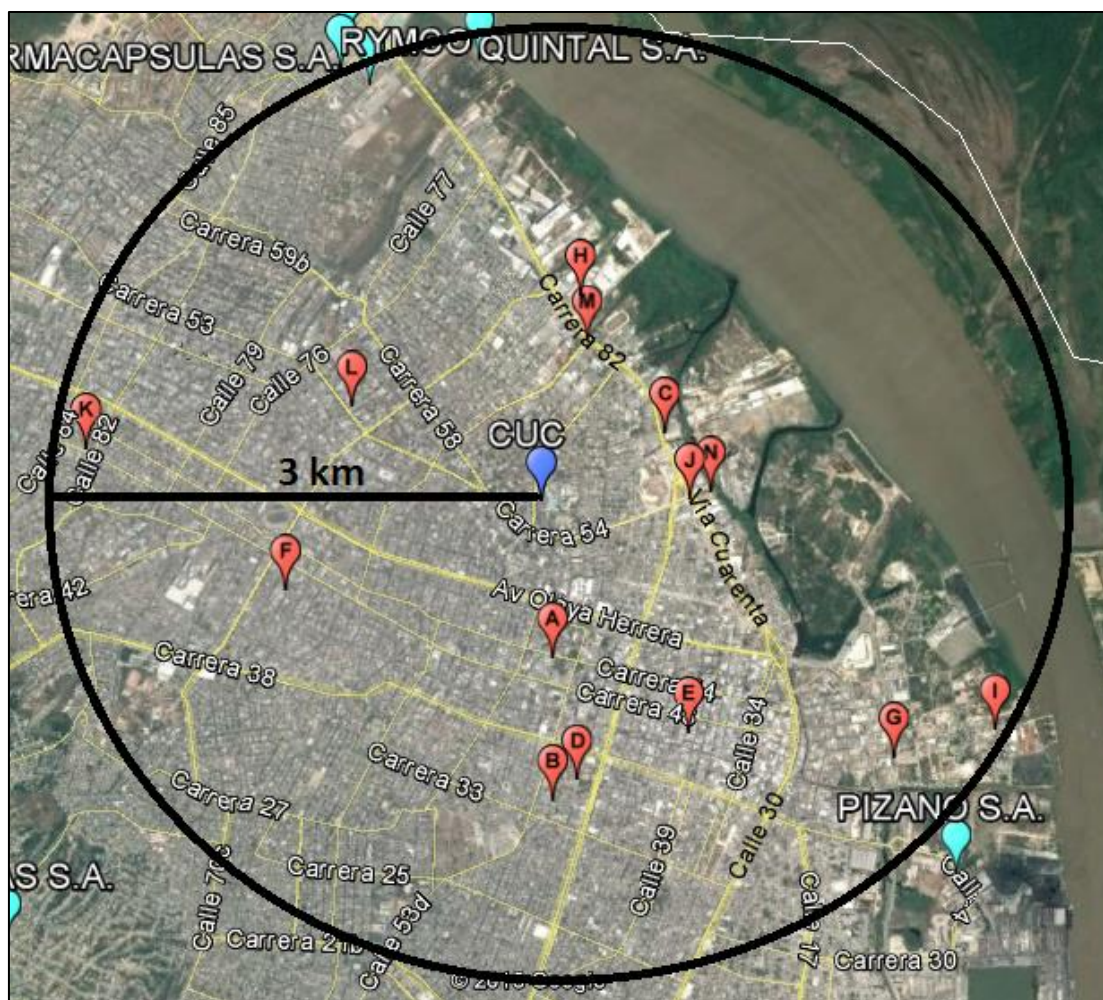


Figura. 1 área de estudio con un radio de 3 km a la redonda, Descripción del área de estudio resaltando que es una zona mixta por que cuenta con una parte industrial y una residencia, tomada de Google Earth.

6.3 Método de muestreo

6.3.1 Equipo.

El equipo de monitoreo utilizado en la investigación fue el Partisol 2000i presentado en la figura 2, cuenta con funcionamiento manual y se encuentra compuesto por un microprocesador encargado de dirigir la recolección del material particulado. El principio básico de funcionamiento consiste en extraer a través de una entrada conocida como cabezal, un flujo de aire constante establecido por el operador del equipo, el aire con partículas se dirige entonces a

través de un filtro de colección compuesta de un material adecuado como lo es cuarzo, vidrio donde se recoge el material en partículas (Sokhi, Ranjeet, O'Connor, McManus & Lee, 1998). Un sistema de control de flujo volumétrico activo, permite mantener un flujo volumétrico constante definido utilizando datos procedentes de sensores que miden la temperatura ambiente y la presión ambiente. Una bomba de pistón crea un vacío para extraer la corriente de muestra a través del filtro y controlador de flujo másico de entrada (Vincent, 2007).



Figura. 2. Equipo Partisol 2000i para el monitoreo de material particulado. R Doria & T. Porras, 2017.

6.3.2 Medición de material particulado.

El monitoreo se llevó a cabo durante los meses de abril, mayo, junio y julio con el objetivo de evaluar dos periodos importantes en la ciudad de barranquilla como es la época seca y la época húmeda; cada tres días se recolectaban las muestras para obtener un numero representativo como fueron 25 muestras siguiendo lo estipulado en el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (Herrera Torres & Instituto de Hidrologia, 2005) y en la Resolución 610 del 2010, del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial (MAVDT, 2010), Los filtros para determinar la cantidad de masa recolectada durante el período de muestreo fueron de cuarzo con medidas de 47mm, se climatizaron antes y después del muestreo en un desecador que le retirara la humedad que pudo haber tomado el filtro en el ambiente y a una temperatura ambiente de 22°C, se ubicaban en el equipo durante 24 horas y luego de ser retirados del equipo monitoreo se depositaban en bolsas ziploc, garantizando su protección al ser transportados hasta el laboratorio. Se realizaron tres pesajes para luego promediarlas y obtener el peso final del filtro. Fue determinado el peso inicial y final del filtro para el cálculo de la concentración de material particulado de manera gravimétrica siguiendo el estándar EPA 40 CFR Pt. 50 App. B y 40 CFR Pt. 50 App. J.(EPA, 2006).



Figura 3. Filtros de cuarzo utilizados para el monitoreo de material particulado. R Doria & T. Porras, 2017.



Figura 4. Equipo de muestreo Partisol 2000i ubicado en la azotea del bloque 9. R Doria & T. Porras, 2017.

6.3.3 Cálculo de la concentración.

La metodología para determinación de la concentración de PM_{10} fue mediante la *Ecuación 1*, además se utilizó la matriz de base de cálculo mostrada en la tabla 1, Para establecer un orden de los días de monitoreo como de de las variables que se necesitaban para el estudio.

En la *Ecuación 1* se determina la concentración de las partículas en suspensión (Cps) mediante la relación de Peso final del filtro en gramos (P_{final}) menos Peso inicial del filtro en gramos ($P_{inicial}$) multiplicado por 10^6 que es el factor de conversión a microgramos, y divididos entre el caudal de aire que pasa por el filtro (Q) por el tiempo de muestreo en minutos (t). Las medidas de concentración de material particulado en la atmósfera se expresan en unidades de microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$).

Ecuación 1 Cálculo de la concentración de PM_{10}

$$Cps = \frac{(P_{Final} - P_{Inicial}) * 10^6}{Q * t}$$

Se presenta a continuación un ejemplo de cálculo de concentración mediante la .

Ecuación 1, iniciando el muestreo el día 13/04/15 y finalizado 14/04/15; en la Universidad de la costa, CUC.

Datos

Peso inicial: 0,1503 g

Peso final: 0,1517 g

Caudal: 0,01667 m³/min

Tiempo: 1440 min

$$Cps = \frac{(0,1517 \text{ g} - 0,1503 \text{ g}) * 10^6}{0,01667 \text{ m}^3/\text{min} * 1440 \text{ min}}$$

$$Cps = \frac{1400 \mu\text{g}}{24.0048 \text{ m}^3}$$

$$Cps = 58,32 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

6.3.4 Medición de los parámetros meteorológicos.

La información de los parámetros meteorológicos utilizados para llevar a cabo la investigación fue obtenida a través de una fuente secundaria, suministrada por el IDEAM en la estación del barrio las flores de la ciudad de Barranquilla. Tomando los datos registrados cada hora en la estación semiautomática de las flores, en el periodo comprendido entre abril y julio del año 2015. Las variables determinadas fueron temperatura, radiación solar, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Se utilizó la escala de beaufort una escala numérica que mide el viento y en la cual se muestran los intervalos de velocidades del viento, que es un sistema para estimar y clasificar las velocidades del viento según las distintas intensidades, En el Tabla 1 se muestran 13 tipos de fuerzas que van desde 0-12 con sus descripciones según beaufort con respecto a las diferentes velocidades del viento que se pueden

dar (De la lanza, Caceres, Adame & Hernandez, 2010) (Sierra, 2006).

Tabla 1

Escala Beaufort de velocidades del viento

FUERZA	DESCRIPCION ESCALA DE BEAUFORD	VELOCIDAD (m/s)
0	CALMADO	0
1	LIGERO	0,45 - 1,34
2	LIGERO	1,8 - 3,1
3	LIGERO	3,6 - 5,4
4	MODERADO	5,8 - 8,0
5	FRESCO	9,5 - 10,7
6	FUERTE	10, 0 - 14
7	FUERTE	14 – 17
8	VENDAVAL FRESCO	17 – 21
9	VENDAVAL FUERTE	21 – 25
10	VENDAVAL TOTAL	25 – 29
11	VENDAVAL TEMPESTUOSO	29 – 33
12	HURACAN	33 – 37

Nota: Descripción de las diferentes escalas establecidas por Beaufort Adaptada de Echeverry & Ospina, 2009.

6.4 Análisis estadístico

Para determinar la correlación entre la concentración del material particulado PM₁₀ y las principales variables meteorológicas se utilizaron métodos estadísticos, a través de los cuales se analizaron la influencia directa o indirecta de las variables meteorológicas anteriormente descritas.

Para evaluar si el conjunto de datos se ajusta al criterio de datos paramétrico, se desarrolló una comprobación de supuestos de igualdad de medias, homogeneidad de varianzas y normalidad. Para la evaluación del cumplimiento del supuesto de normalidad se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov. La cual es un procedimiento de ajuste de bondad, que permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica, distribución normal para este caso (Alvarez, 1994).

Para relacionar la concentración de material particulado PM_{10} , con cada una de las variables meteorológicas de manera independiente, se utilizó la técnica de correlación de Spearman ya que la relación entre los datos no es paramétrica (Echeverri & Maya, 2008; Galvis & Rojas, 2006). Esta técnica permite asociar dos variables cuantitativas, determinando la relación lineal entre las variables. Un coeficiente producto de la aplicación de la técnica permitirá definir, la fuerza de la relación lineal entre las dos variables cuantitativas (Fernández & Diaz, 2001). El concepto de correlación está estrechamente unido al concepto de regresión, pues, para que una ecuación de regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a una ecuación de regresión; además si el coeficiente de correlación es grande, el grado de asociación entre las variables es alto (cerca de +1 o -1, y cuando es pequeño o cercano a cero, es bajo. Independiente de las unidades en que se miden las variables (Baró, 2013).

La regresión lineal múltiple es un modelo en el cual se evalúa la influencia de un conjunto de variables explicativas en los datos de otra variable dependiente, es tener diferentes grupos de regresión lineal simple lo cual proporciona una mayor información en la construcción de un modelo y a su vez una mayor precisión para realizar una estimación (Rojo, 2007). El modelo de regresión múltiple se utiliza para predecir el comportamiento de dicha variable dependiente en función de otras variables explicativas.

Finalmente se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA). El cual permitió establecer que variables meteorológicas condicionan las concentraciones de material particulado PM_{10} a partir del conjunto de datos iniciales. Esta técnica transforma las variables ortogonales originales para conseguir un nuevo conjunto de variables independientes que se denominan componentes principales, que van construyendo la importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra según el orden decadente.

Las componentes son combinaciones lineales de las variables originales de las cuales se tiene la expectativa de que solo las primeras toman la mayor parte de la variabilidad de los datos, lo que ocasiona una disminución notable en la dimensión de estos. La técnica consiste fundamentalmente en reducir la dimensión de los datos para simplificar lo más posible el problema en estudio (De La Fuente, 2012).

7. Resultados y discusión

7.1 Aspectos climatológicos

La ciudad de Barranquilla por su ubicación cercana del Ecuador, presenta altas temperaturas por la forma perpendicular en la que caen los rayos solares; además de encontrarse en una zona entre dos extremos climáticos: al norte el desierto de la guajira (región árida) y al sur el valle medio del Magdalena (región húmeda) que recibe la influencia del mar Caribe (Hermelín, 2007).

En la presente investigación se identificará cuál de las variables meteorológicas influyen en el comportamiento del material particulado PM_{10} , por ende, es necesario hacer un análisis gráfico de las variables meteorológicas: temperatura, radiación solar, nubosidad, velocidad y dirección del viento.

A continuación, se presenta de manera detallada cada una de las variables climatológicas analizadas y su comportamiento durante el tiempo de monitoreo.

7.1.1 Temperatura.

En el Tabla 1 se evidencia el comportamiento horario de la temperatura durante los cuatro meses de monitoreo, se observa que la temperatura varía a lo largo del día siendo de menor intensidad en las primeras y últimas horas de cada día, teniendo una variación entre los 26-27 °C. Las temperaturas mínimas se presentan a la hora seis (6) y en un intervalo de tiempo que oscila entre las 9 y las 19 horas los niveles de temperatura aumentan y se registran desde los 28-30 °C. Durante los meses de abril, junio y julio se presentan las temperaturas más altas a las 12 horas y en el mes de mayo se presenta a las 13 horas, pero de manera general se refleja que desde la hora

10 va en aumento hasta la hora 17. Se puede decir que durante la mayor parte de los días el sol brilla en promedio más de 6 horas /día, alcanzando valores mayores a 8 horas/día durante el periodo.

Tabla 1

Temperatura promedio horario (°C) estación meteorológica Las Flores- Barranquilla correspondiente a abril- Julio 2015.

HORA	Abril	Mayo	Junio	Julio
0	26,6	27,7	27,3	27,0
1	26,6	27,7	27,3	27,0
2	26,5	27,7	27,3	26,9
3	26,4	27,7	27,2	26,8
4	26,4	27,4	27,1	26,7
5	26,4	27,0	27,1	26,6
6	26,4	26,9	26,9	26,4
7	26,9	27,4	27,5	26,9
8	27,5	27,2	28,1	27,5
9	28,1	28,7	28,8	28,2
10	28,6	29,3	29,2	28,7
11	28,6	29,0	29,3	28,9
12	28,8	29,9	29,6	29,1

13	28,7	30,1	29,4	28,9
14	28,5	30,0	29,3	28,6
15	28,3	29,8	28,8	28,4
16	28,0	29,3	28,4	28,1
17	27,5	28,8	28,1	27,8
18	27,1	28,3	27,7	27,4
19	26,9	28,1	27,3	27,2
20	26,8	28,0	27,3	27,1
21	26,9	27,9	27,2	27,0
22	26,8	27,8	27,2	27,0
23	26,7	27,7	27,2	26,9
Promedio	27,3	28,3	27,9	27,5

Nota: Comportamiento Horario de la Temperatura promedio horario (°C) de la estación meteorológica Las Flores correspondiente a abril- Julio 2015 Adaptada del IDEAM.

Se puede analizar en la Figura 1 un comportamiento similar entre los valores obtenidos de temperatura máxima, promedio y mínima ya que presentan las temperaturas menores en el mes de abril y las mayores en junio y vuelve a decrecer en julio; la temperatura promedio máxima es de 28,2 °C y el promedio mínimo va desde 26,9 °C hasta 27,5 °C. las temperaturas en abril van desde 25,8 °C hasta 31,9 mayo junio julio.

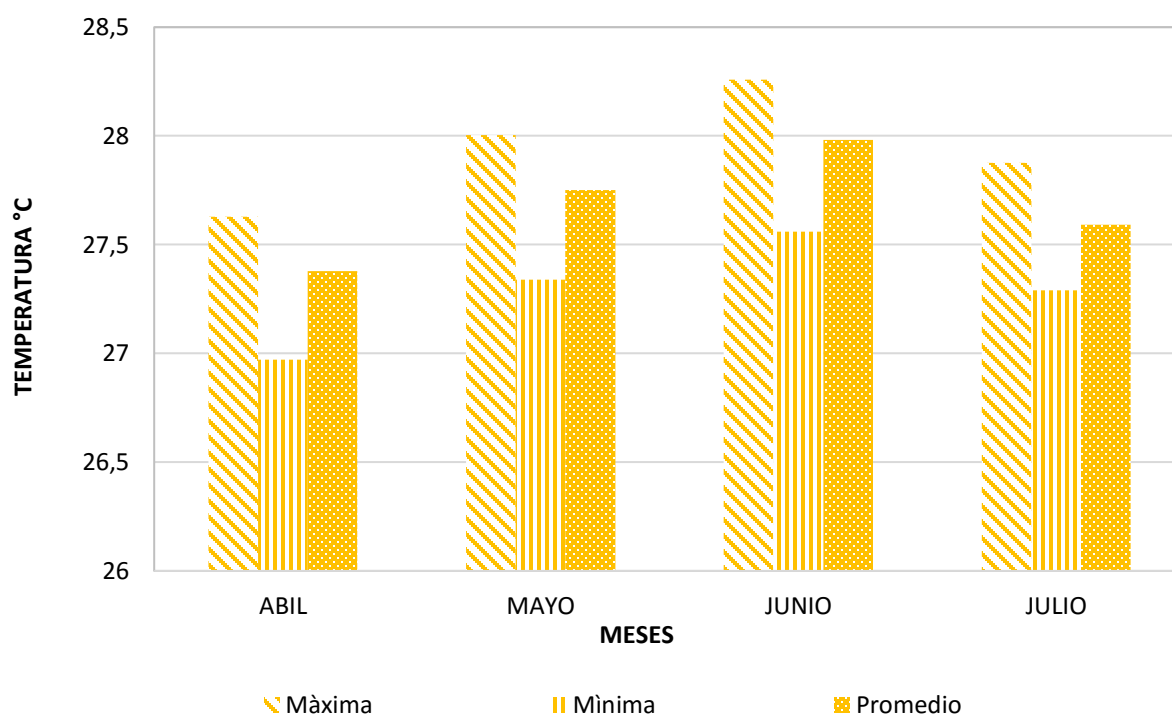


Figura 1. Comportamiento del promedio mensual de la temperatura máxima, mínima y promedio en grados centígrados (°C) de los datos de la estación meteorológica Las Flores IDEAM – Barranquilla durante los meses de Abril- Julio del 2015.

7.1.2 Precipitación.

El clima de Barranquilla es de tipo tropical seco se caracteriza por dos periodos uno seco que va desde diciembre a abril (entre 1,0 y 25 mm/mes) y se presenta por los vientos alisios del noreste; el otro periodo es el húmedo que comprende los meses de mayo hasta noviembre (lluvias que oscilan entre 70 y 178 mm/mes), en este periodo surge un fenómeno conocido como "Veranillo de San Juan" que consiste una sequía por un corto tiempo a causa de los vientos alisios del sureste (CIOH, 2010). Durante el periodo de monitoreo comprendido desde el mes de abril a julio del año 2015 no se registraron lluvias, porque se presentó un fenómeno natural conocido como el fenómeno del niño, que afecta a Colombia en algunos años por variaciones y desajustes climatológicos que alteran las condiciones de sequía en las costas del océano pacifico.

Este fenómeno se genera por la interacción entre el océano y la atmósfera (Martelo, 1998). Es un fenómeno propio de la variabilidad climática, que se manifiesta mediante cambios en los patrones normales de comportamiento de las corrientes oceánicas por el debilitamiento de la confluencia de los vientos alisios, la distribución de la precipitación y la temperatura (Mejia, 2007).

7.1.3 Radiación solar.

Durante el periodo de monitoreo se registran los niveles que alcanzo la radiación solar, los cuales se evidencian en el Figura 2 , donde se refleja un comportamiento mínimo en las primeras horas del día entre la 0:00 y La 5:00 con valores que van de los 10,8 en abril hasta 14,46 watios - h/m^2 en junio, después con el aumento de las horas del día aumenta la radiación solar entre las 6 y las 18 pero hasta la hora 12 en la que se registra el máximo valor de 917,6 watios - h/m^2 en el mes de abril, siendo a la hora 23 en la que se vuelve a lograr la hora mínima de 10,53 watios - h/m^2 en el mes de abril.

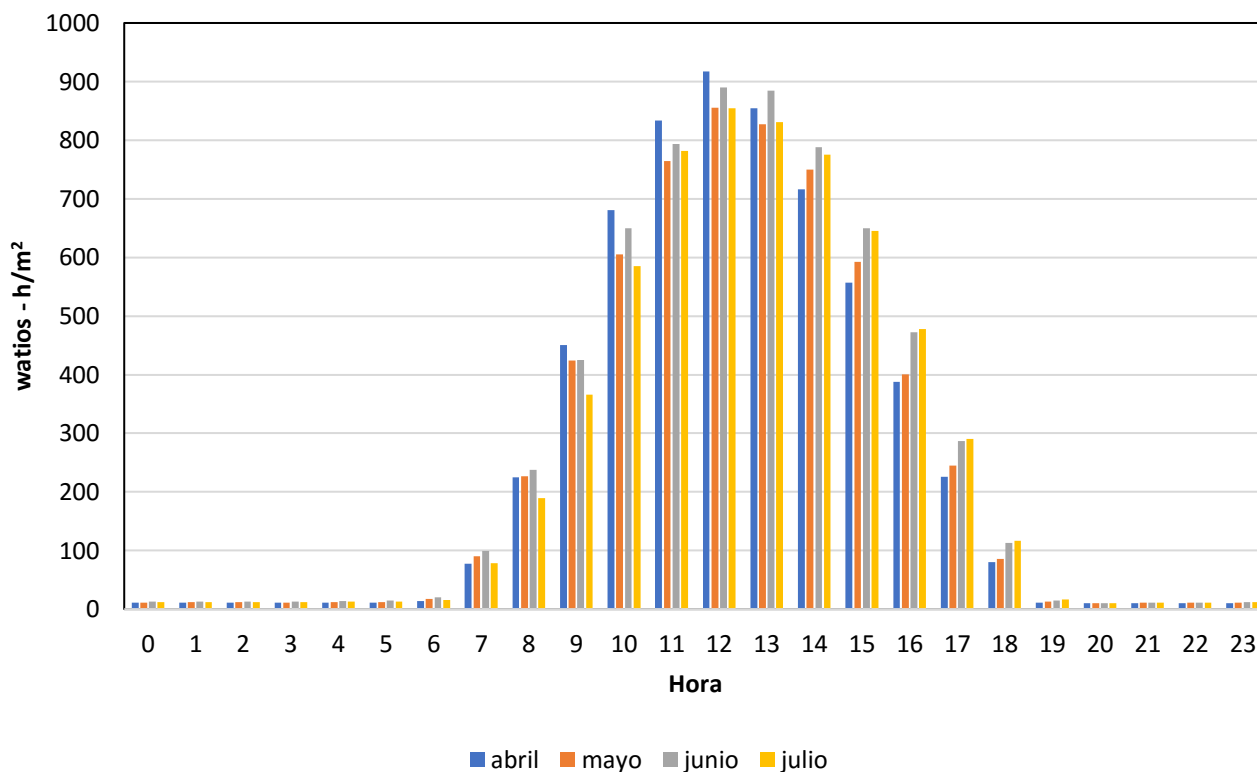


Figura 2. Comportamiento promedio mensual de la radiación solar $W - h/m^2$ en la estación meteorológica las flores IDEAM en los meses de Abril – Julio del 2015.

7.1.4 Humedad relativa.

La humedad relativa en la región presenta los más altos niveles en octubre con 84%, siendo este el mes más lluvioso, le siguen septiembre y noviembre con 83%, agosto con 81%, mayo, junio y Julio con 80%. Los meses de menor humedad son febrero y marzo con 77%, aproximadamente (Hermelín, 2007), lo cual coincide con el Figura 3 se observa la humedad relativa en la ciudad de Barranquilla con valores entre 83,13 y 32,11 % durante los meses de monitoreo el valor máximo se registró en el mes de junio y el mínimo en julio. En la Figura 4 se observan valores horarios de la humedad relativa máximos en las primeras y últimas horas del día 87,6 % en el mes de junio para la hora 5, y la humedad relativa mínima entre las horas 10 - 13 del día con un valor mínimo de 74,73 % para la hora 11 del mes de julio.

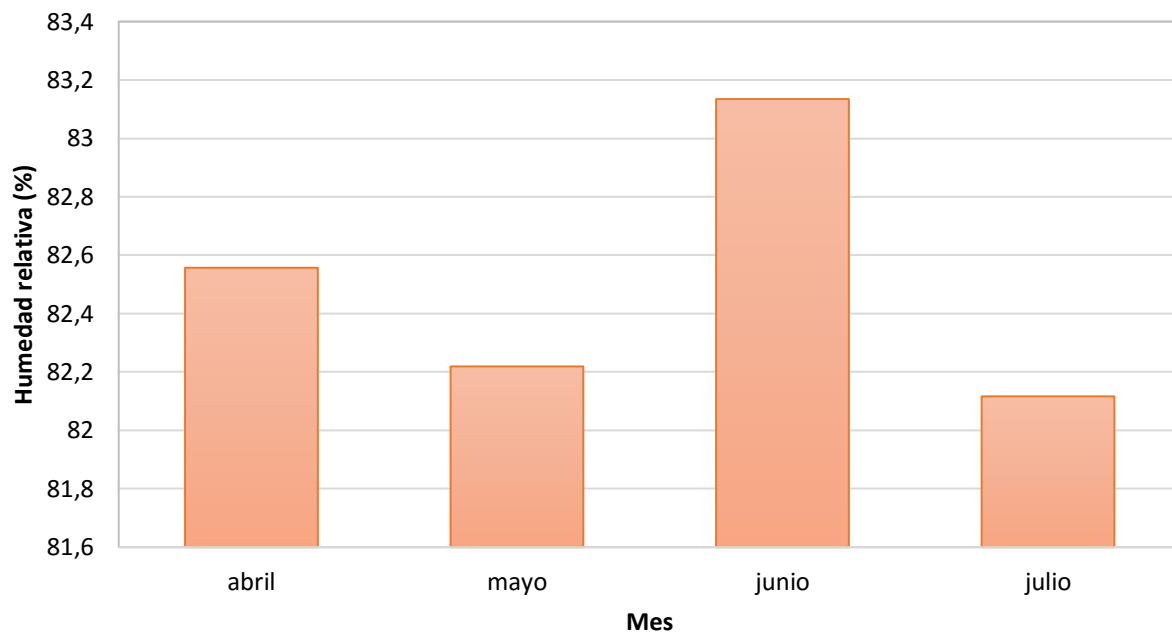


Figura 3. Comportamiento del promedio mensual de la humedad relativa en porcentajes (%) de la estación meteorológica las flores del IDEAM durante los meses de Abril – Julio del 2015.

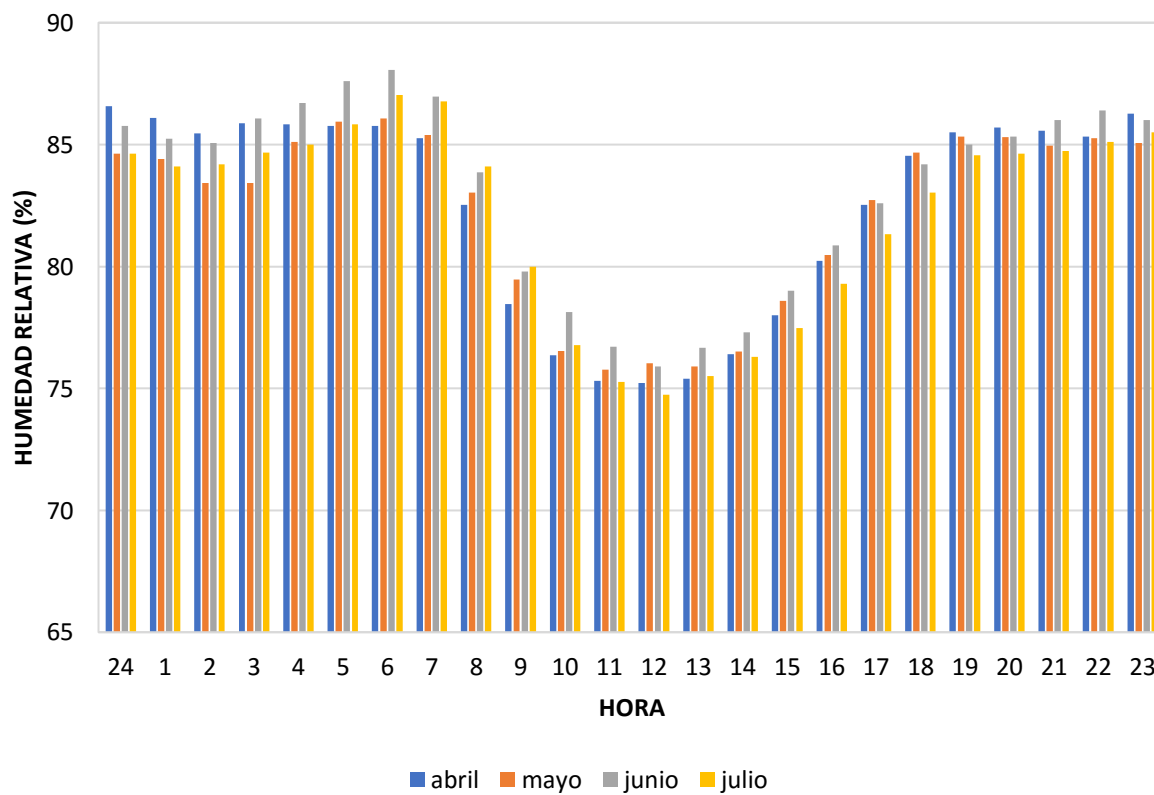


Figura 4. Comportamiento del promedio horario de la humedad relativa (%) de la estación meteorológica las flores IDEAM durante los meses de Abril – Julio del 2015.

7.1.5 Velocidad del viento.

Los vientos en la ciudad de barranquilla son predominantes entre los meses de diciembre a marzo (Época Seca), por las posiciones propicias para que se presente flujo constante de viento en la ciudad, ocasionando velocidades que oscilan entre 4,5 y 6,1 m/s, mientras que de abril a junio se presentan velocidades medias entre 2,7 y 4,8 m/s. De igual manera, durante la época de transición de junio a julio se ostentan velocidades medias entre 2,7 y 3,2 m/s. Durante la segunda época humedad del año (agosto a noviembre) se presentan las velocidades medias menores, las cuales oscilan entre 2,2 y 3,1 m/s (Hermelín, 2007)

Según la Figura 5 en los meses de junio y julio se presentaron las velocidades más altas de velocidad del viento, siendo junio el de más representativo de los cuatro meses teniendo en cuenta que la velocidad del viento es una variable vectorial se consolidaron los datos de la estación meteorológica de IDEAM, mediante promedios vectoriales los cuales son de gran relevancia en el mes de junio, teniendo en cuenta que las velocidades del viento varía de un lugar a otro en el planeta, dependiendo tanto de las condiciones climáticas locales como del paisaje y de su superficie (Hernández & Ortega, 2013).

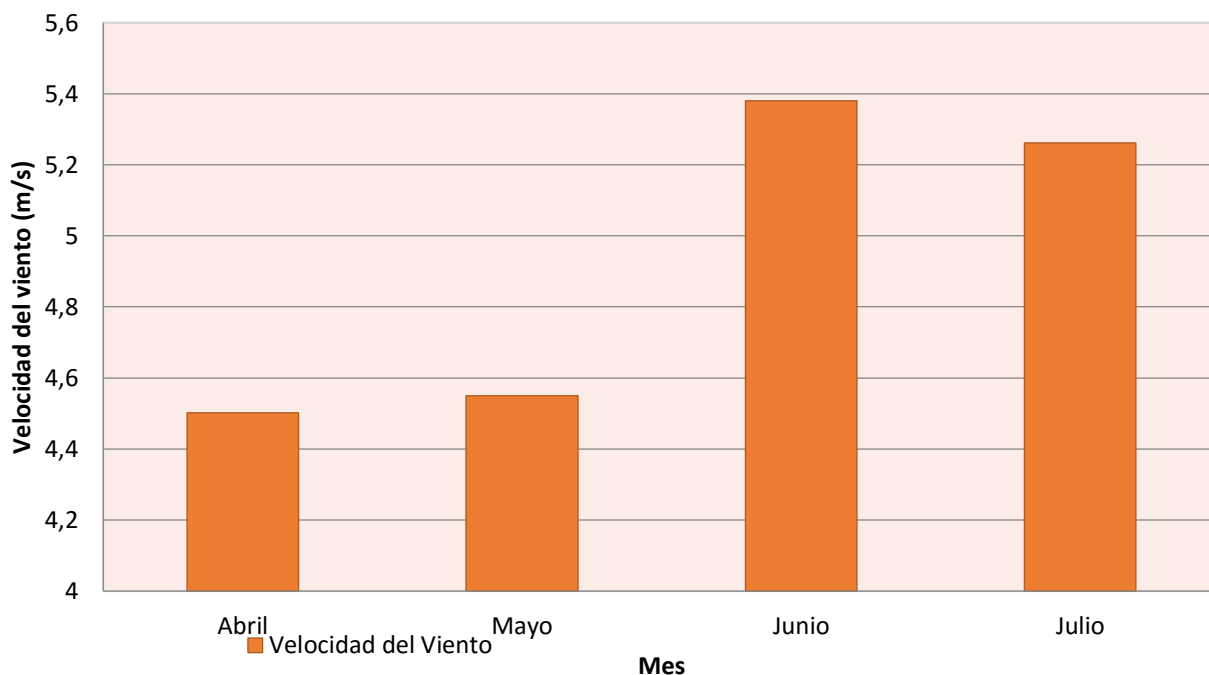


Figura 5 Velocidad promedio mensual del viento en metros sobre segundo (m/s) de la estación meteorológica las flores IDEAM durante los meses de abril-Julio 2015.

7.1.6 Dirección del viento.

Predominan dos flujos de viento con direcciones noreste (42.7%) y norte (25%), con predominio de vientos moderados. También se presentan frecuencias relativas al Este, Sureste y Sur, con 5.8%, 6.1% y 6.1% de observaciones, respectivamente (Corte, Sierra & Valencia, 2015).

En la Figura 6 se observa la dirección del viento en el mes de abril donde se observan vientos procedentes del norte (N) y noreste (NW) en un 12.2% y predomina la dirección hacia el suroeste, lo que genera un arrastre de contaminantes en dicho sentido, en el rango de velocidad del viento entre 5.7 m/s y 8.8 m/s con un porcentaje de viento en calma del 28.7% y teniendo en cuenta el comportamiento del viento esta entre ligero y moderado según la tabla 1.

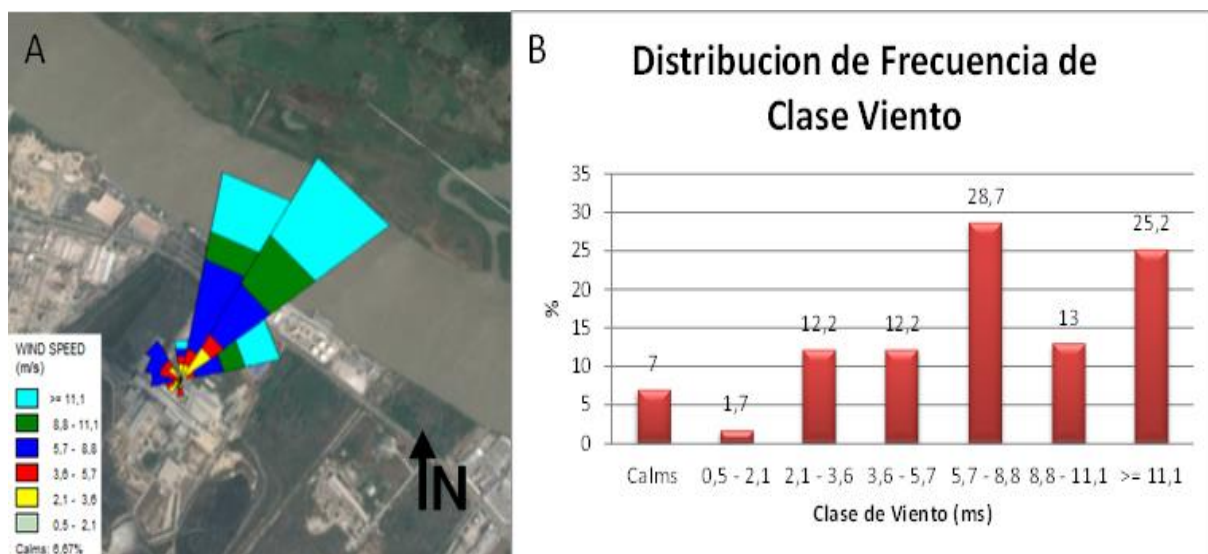


Figura 6. A) Rosa de vientos -Dirección del viento B) Distribución de frecuencia del mes de abril (2015), estación Meteorológica las flores IDEAM.

En el Figura 7 Se evidencia que el viento posee un comportamiento predominante hacia el suroeste con calmas máximas de 44,2 % en la velocidad del viento entre 5,7 y 8.8 m/s y calmas mínimas de 14 % en la velocidad del viento entre 0.5 y 2.1 m/s, según la escala de Beaufort en la tabla 1 nos indica que la velocidad del viento esta entre ligero y moderado.

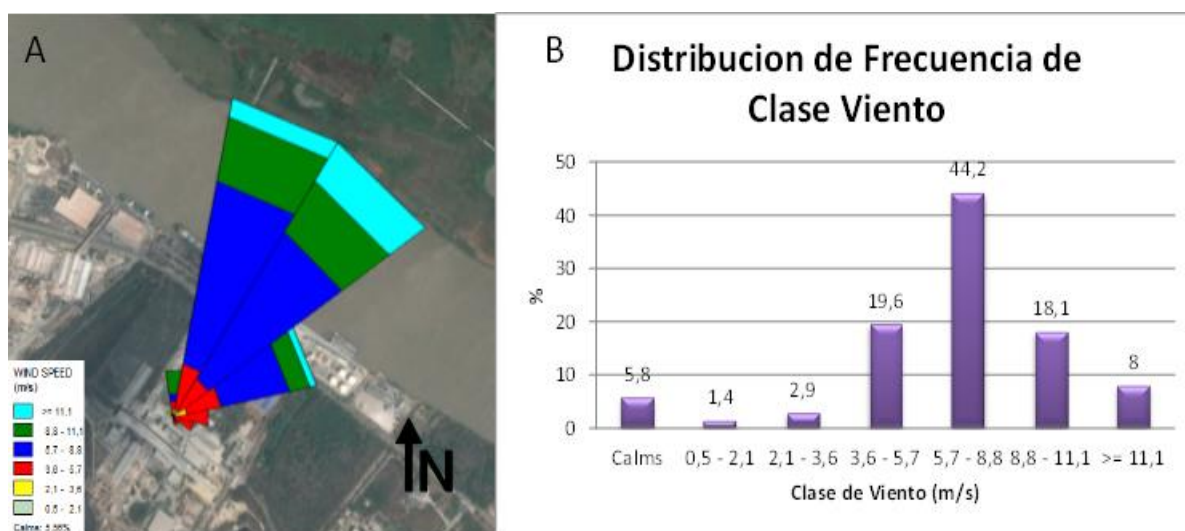


Figura 7 A) Rosa de vientos - Dirección del viento B) distribución de frecuencia del mes de Mayo (2015), estación Meteorológica las flores IDEAM.

Se puede analizar en la Figura 8, que en el mes de junio según los datos suministrados por la estación meteorológica las flores, procedentes del noreste con calmas que van desde la mínima 3,1 % en el rango de 0,5 – 2,1 m/s y van aumentando hasta que llegan a la velocidad del viento entre 8,8 – 11,1 m/s que se registra la calma máxima del 36.0 % hasta disminuir a 21,7 % en una velocidad $\geq 11,1$. Según la velocidad en la que registra la calma máxima haciendo una comparación con la escala de beaufort, la tabla 1 nos indica una velocidad del viento fresco y fuerte.

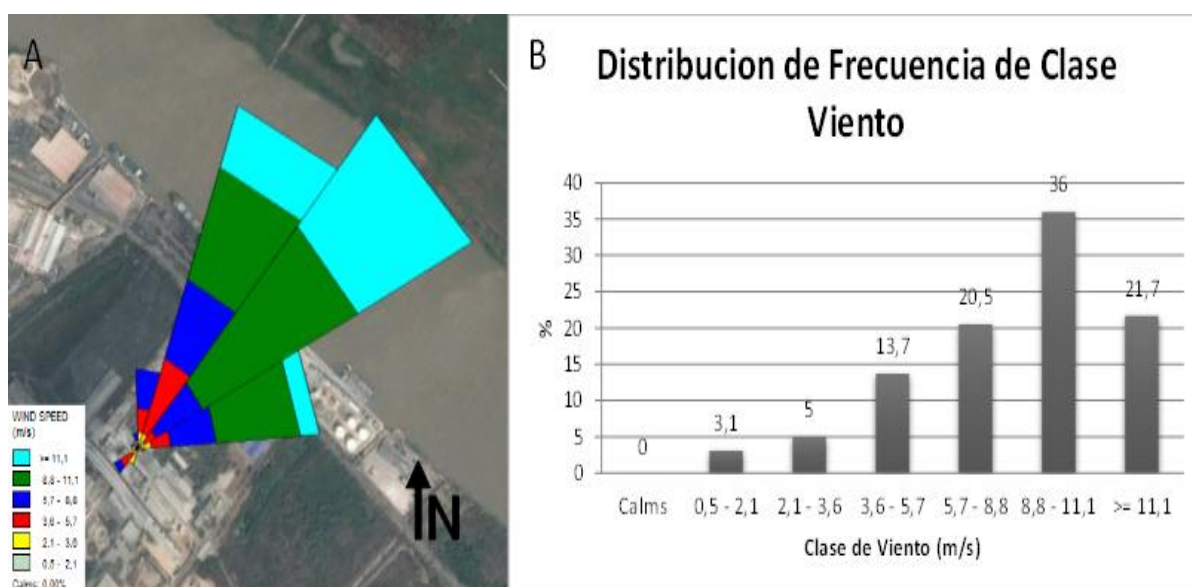


Figura 8 Estación Meteorológica las flores IDEAM A) Dirección del viento B) distribución de frecuencia del mes de Junio (2015), estación Meteorológica las flores IDEAM.

La dirección del viento y velocidad predominante en el mes de julio se observa en la Figura 9, en el cual los vientos son procedentes noreste (NW) hacia el suroeste (SE), lo que posiblemente ocasiona en dicho sentido un arrastre de contaminantes, en el rango de velocidad del viento en calma va entre 5.7 m/s y 8.8 m/s con un porcentaje del 32,3%, teniendo en cuenta que según la tabla 1 la escala de beaufort indica que el comportamiento de la velocidad del viento es moderado.

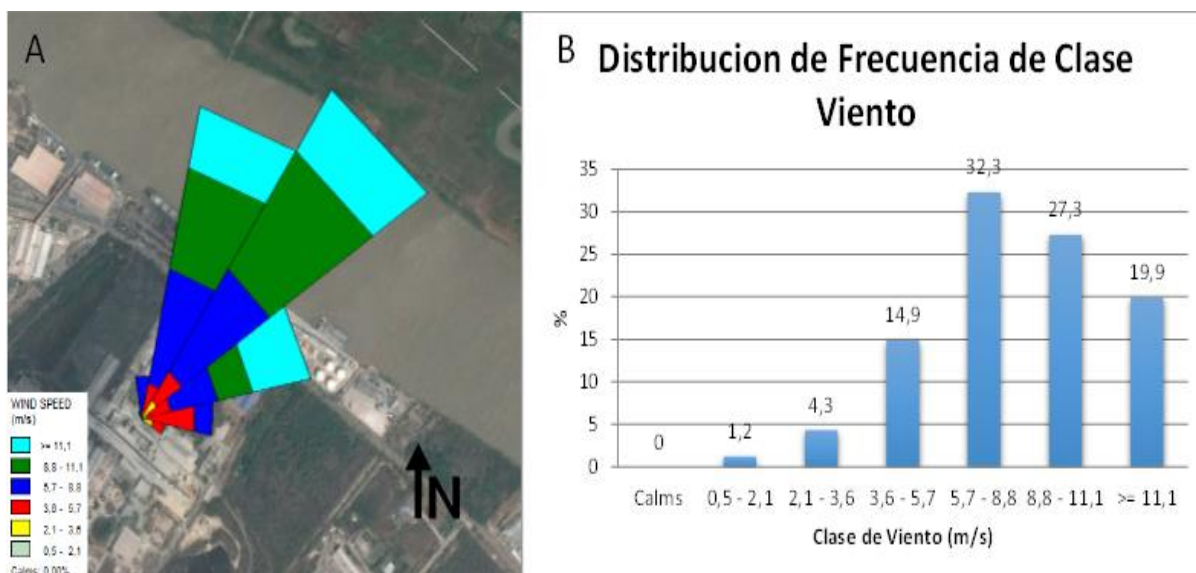


Figura 9 Rosa de vientos -Dirección del viento B) distribución de frecuencia del mes de Julio (2015), estación Meteorológica las flores IDEAM.

7.2 Nivel de contaminación por PM₁₀

En la Figura 10, podemos observar las concentraciones de PM₁₀, obtenidas durante los días de monitoreo, las cuales al ser comparadas con el límite máximo permisible diario según la normativa colombiana presentado en el Tabla 2

Resolución 610 del 2010 de calidad de aire, se registraron en la mayoría de los datos concentraciones de PM₁₀ que cumplen con la norma a excepción de los días 17/04/15 y 7/05/15 que fueron dos valores irregulares con respecto a los demás datos siendo estos días viernes y jueves respectivamente, se realizó la comparación con el límite diario debido a que el tiempo de monitoreo fue de cuatro meses.

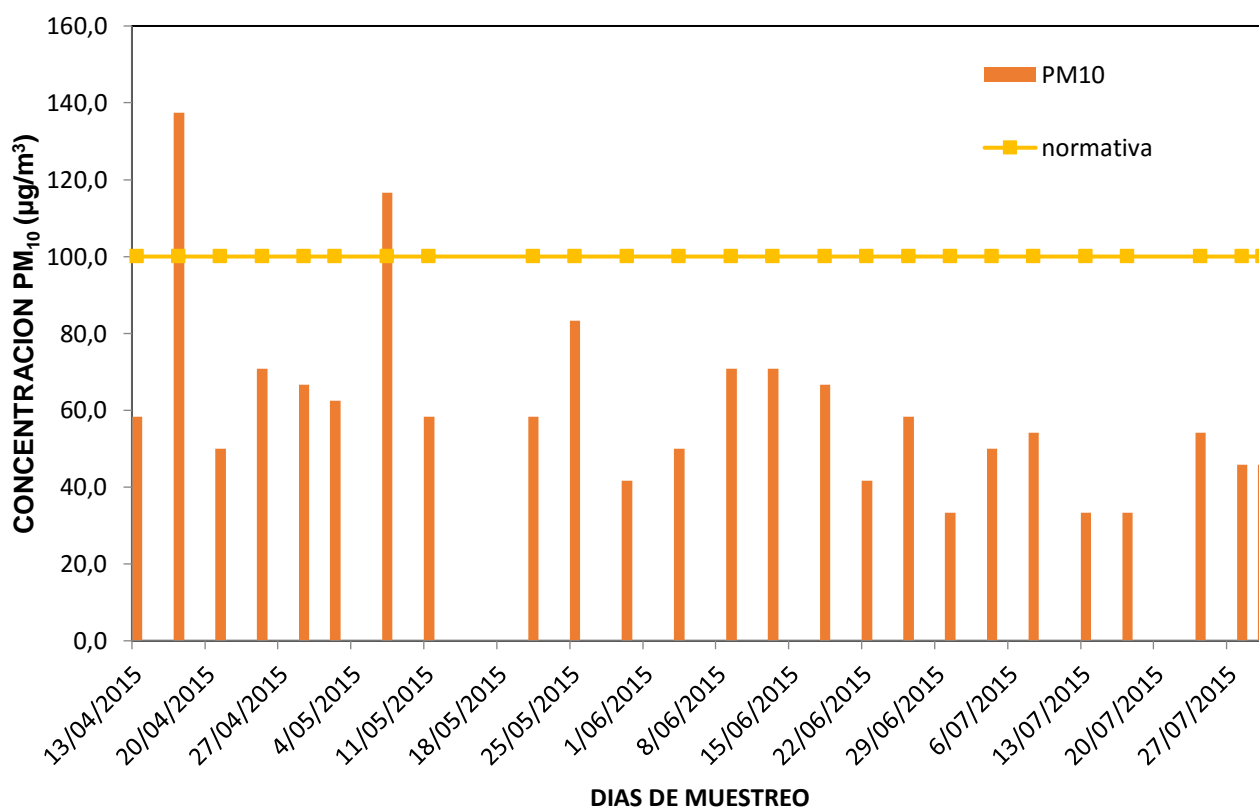


Figura 10. Variación temporal de la fracción respirable PM₁₀ comparación con la normativa colombiana resolución 610 del 2010. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Se puede apreciar en la Figura 11 las concentraciones de la fracción respirable PM_{10} que al ser comparadas con las directrices establecidas por la OMS presentadas en el *Tabla* de las cuales se puede decir que no se estaría cumpliendo con lo establecido se observa que en 15 de las 25 mediciones sobre pasan los límites de la OMS, Es evidente que la OMS es una normativa más restrictiva que la colombiana ya que pretender reducir la contaminación en el mundo y de esta manera favorecer los países que presentan altos índices de mortalidad por enfermedades respiratorias asociadas a contaminación (OMS, 2016).

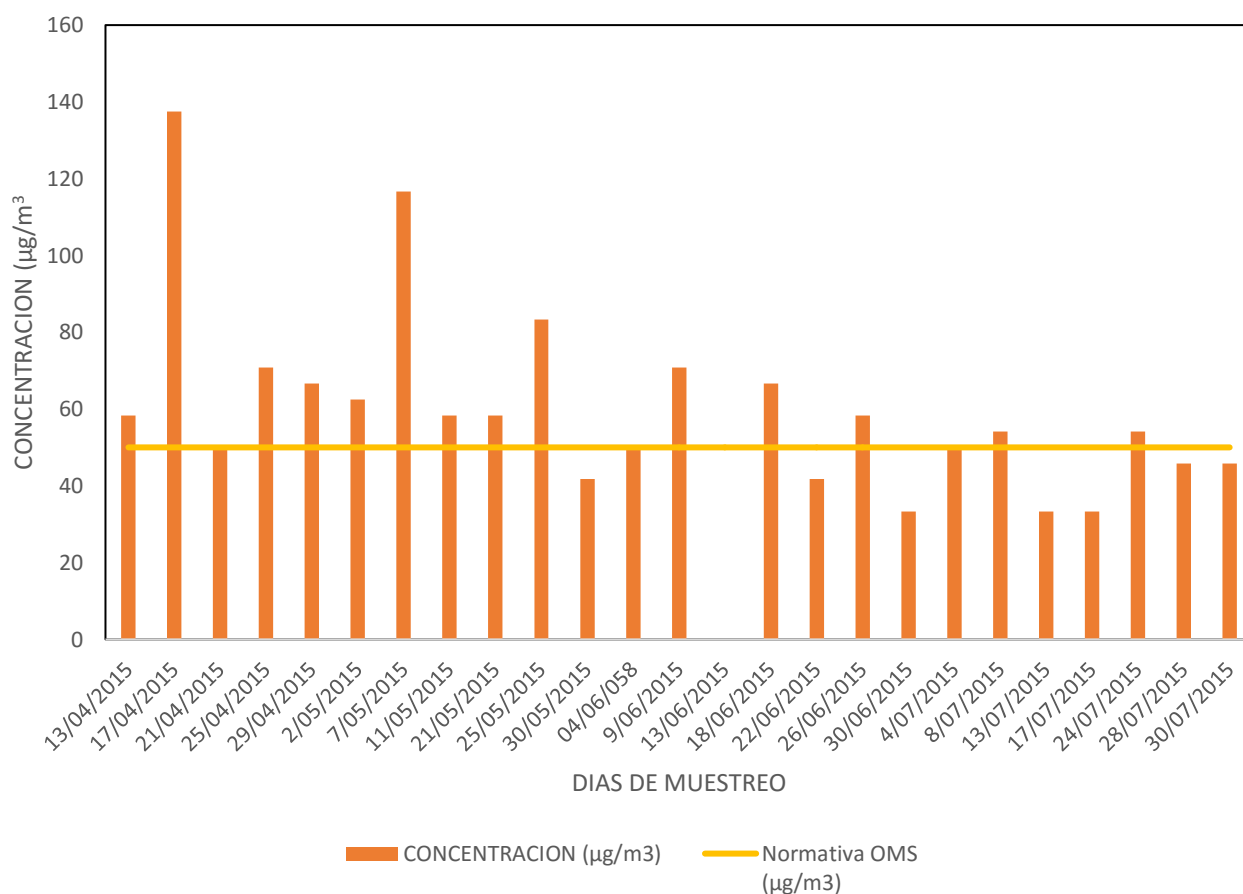


Figura 11. Variación temporal de la fracción respirable MP_{10} comparación con la Organización Mundial de la Salud OMS 2008. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.

7.3 Estadística descriptiva

Los histogramas de las variables meteorológicas son presentados en la *figura 12*. La revisión gráfica del ajuste a una distribución normal realizada con base en los histogramas, demostrando que los datos se ajustan a la distribución normal correspondiente a la concentración presentada en la *figura 12a* siendo una curva con distribución asimétrica con presencia de puntos atípicos relacionados con los días en los cuales se presentaron mayores concentraciones de material particulado. Para el caso de las variables, Velocidad del viento *figura 12b*, Dirección del viento (*figura 12c*), Temperatura (*figura 12e*) y radiación global (*figura 12f*) no hay un ajuste significativo a la distribución normal (Bidegain & Diaz, 2011). Una posible causa de este comportamiento es la variabilidad diaria e incluso horaria durante un mismo día. Para el caso de la humedad relativa los valores obtenidos indican una distribución más próxima de una curva de distribución normal *figura 12d*.

La revisión cuantitativa mediante la prueba de kolmogorov-Smirnov arroja los estadísticos $P = 0,99$ para concentración de PM_{10} , $0,44$ para la temperatura, $0,29$ para la radiación global, $0,76$ para la presión atmosférica y $0,98$ para la humedad relativa. Para todos los casos, debido a que el P valor más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a $0,05$, no se puede rechazar la idea de que los resultados de concentración medidos y los parámetros meteorológicos proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Valencia, 2010).

Histogramas

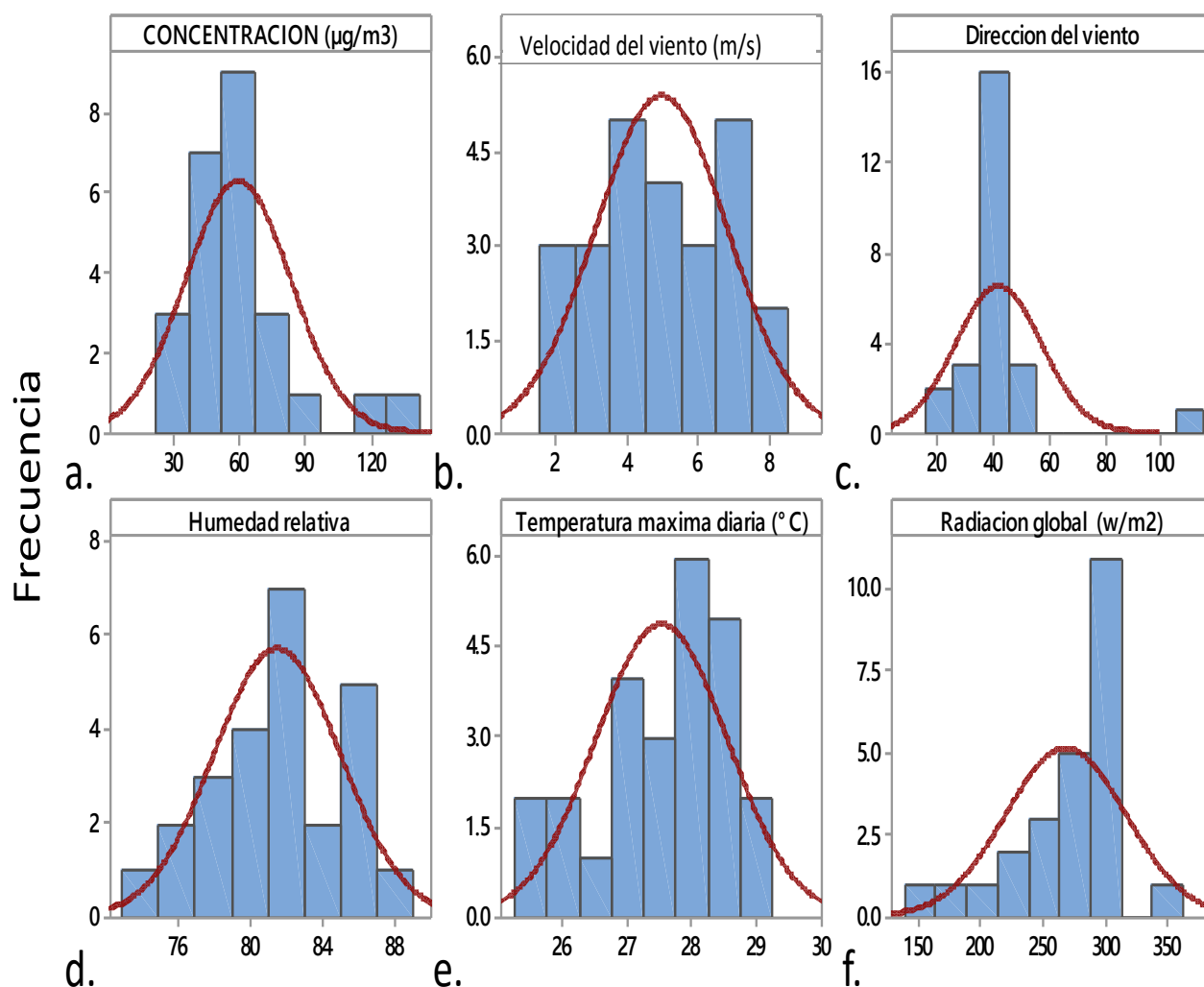


Figura 12 Histogramas para: a) concentración de material particulado; variables meteorológicas: b) Velocidad del viento, c) Dirección del viento, d) Humedad relativa, e) Temperatura máxima diaria y f) Radiación global, R Doria & T. Porras, 2017.

La Figura 13 presenta los diferentes diagramas de caja (boxplot) para los valores obtenidos de las concentraciones y variables meteorológicas, durante el periodo de muestreo de abril a Julio de 2015. Pueden observarse algunos valores atípicos fuera altos que corresponden a los valores de ($137,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $116,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenidos en los días 17 de abril y 7 de mayo

respectivamente. De igual forma los diagramas de caja de las variables de dirección del viento Figura 13c, radiación solar Figura 13f muestran también valores atípicos. Finalmente puede observarse la asimetría existente para los valores meteorológicos de velocidad del viento Figura 13b, humedad relativa Figura 13d y temperatura Figura 13e.

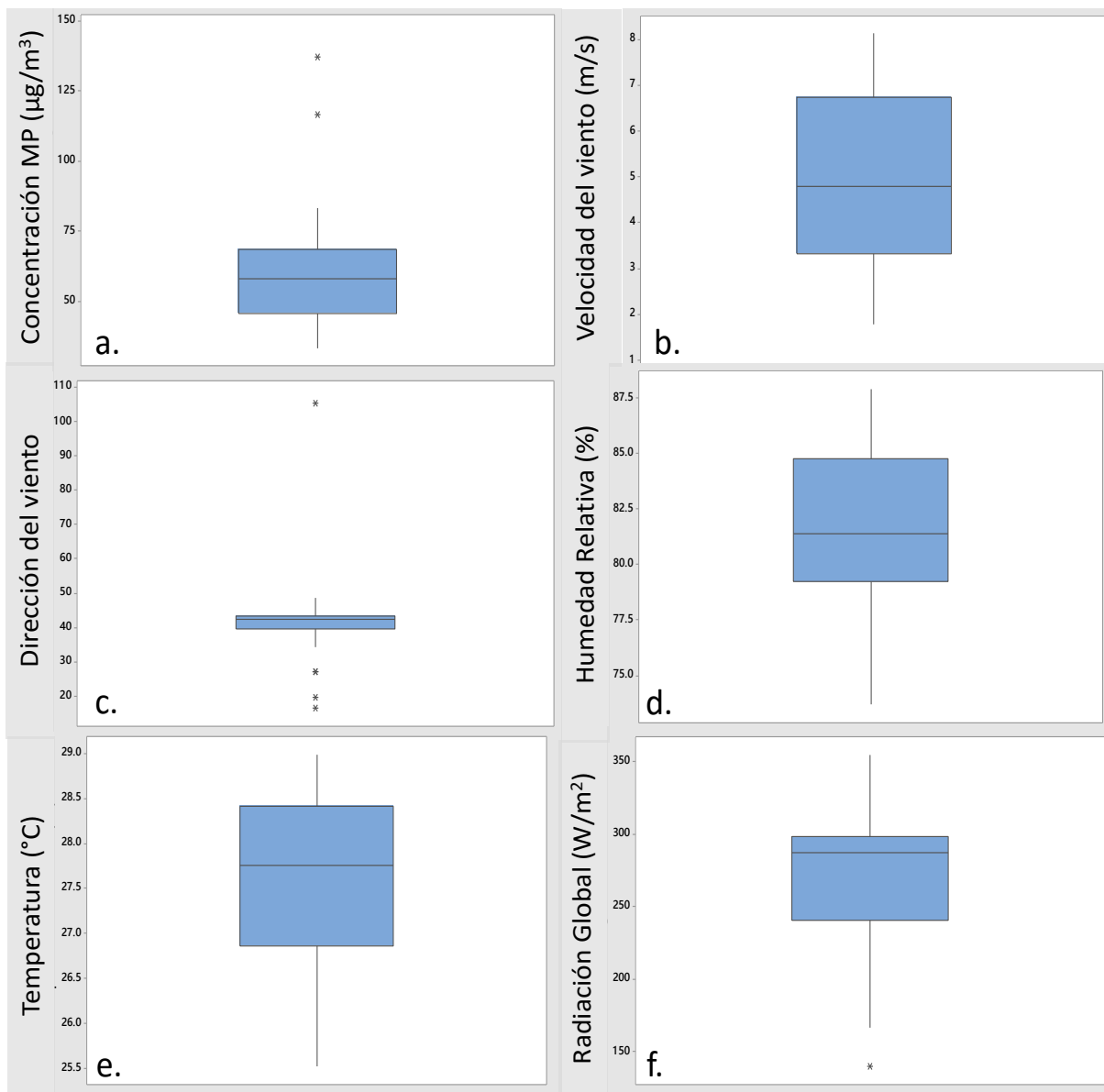


Figura 13. Boxplot para: a) concentración de material particulado; variables meteorológicas: b) Velocidad del viento, c) Dirección del viento, d) Humedad relativa, e) Temperatura máxima diaria y f) Radiación global, R Doria & T. Porras, 2017.

7.3.1 Análisis descriptivo.

En la Tabla 2 se muestra el resumen estadístico descriptivo para las variables meteorológicas y la concentración de material particulado, se tiene según la curtosis y el sesgo estandarizado se puede evaluar la forma de la distribución de los datos tomando valores entre -2 y +2. Se observa que la dirección del viento presenta una curtosis mucho mayor de 2 (11,1), por lo tanto, es muy probable que no se ajuste a una distribución normal o que presente una distribución leptocurtica (EHU, 2016), es decir una distribución aguada y muy cercana al valor medio; Esto debe comprobarse con el gráfico de ajuste a la distribución normal, como la prueba de kolmogorov.

Tabla 2

Resumen estadístico para las variables meteorológicas y la concentración de PM₁₀

	Concentración	Dirección del viento	Humedad relativa	Radiación global	Temperatura	Velocidad promedio del viento
Recuento	23	23	23	23	23	23
Promedio	54,7	41,7	81,7	266,5	27,6	4,9
Desviación Estándar	13,3	16,1	3,45	50,0	1,0	1,9
Coefficiente de Variación	24,40%	38,60%	4,28%	18,88%	3,76%	38,75%
Mínimo	33,3	17	74	140	25,5	1,8
Máximo	83,3	105	88	354	29	8,1
Rango	50	88	14	214	3,5	6,3
Sesgo	0,18	5,18	-0,34	-1,98	-1,54	-0,06
Estandarizado						
Curtosis	-0,42	11,14	-0,28	0,96	-0,30	-1,27
Estandarizada						

Nota: Resumen estadístico de las concentraciones de material particulado y las distintas variables meteorológicas utilizadas para determinar la correlación estadística, R Doria & T. Porras, 2017.

7.4 Correlación entre las variables meteorológicas y el material particulado PM₁₀

7.4.1 Relación gráfica.

A continuación, se describe los vínculos que tienen las variables meteorológicas con el comportamiento de las concentraciones diarias de PM₁₀ para determinar cómo actúan las variables meteorológicas en el contaminante.

En la *Figura 14* se observa que las concentraciones de PM₁₀ y la velocidad del viento son dos factores inestables. Lo cual es un indicador de la relación entre ellas (Miranda & Ortiz, 2008). Para la fracción respirable PM₁₀ se pueden identificar que los valores máximos y mínimos en la gráfica son 137,4 µg/m³ el 17 de abril y 33,3 µg/m³ el 30 de junio, el 13 y 17 de julio y se evidencia un comportamiento constante en la concentración de PM₁₀, mientras que en estos dos días la velocidad del viento aumenta. Estudios presentados por Morales, (2012) y Gómez et al. (2000) señalan que la fracción gruesa del material particulado se reduce cuando la velocidad del viento se incrementa hasta 4 m/s, pero después la concentración se incrementa para velocidades de viento más altas concluyendo que un pequeño componente del material particulado grueso es el resultado de la resuspensión inducida por el viento. También se percibe que la velocidad del viento presenta valores máximos de 12,4 m/s el 4 de julio y el mínimo de 4,3 m/s para el 4 de junio. La influencia de la velocidad del viento en el material particulado es importante ya que esta variable se encarga de transportar o dispersar este tipo de contaminante de un área a otra y por lo tanto se puede decir según (Morales, 2012) y Sierra, (2006) se puede decir que la concentración es una función inversa a la velocidad del viento.

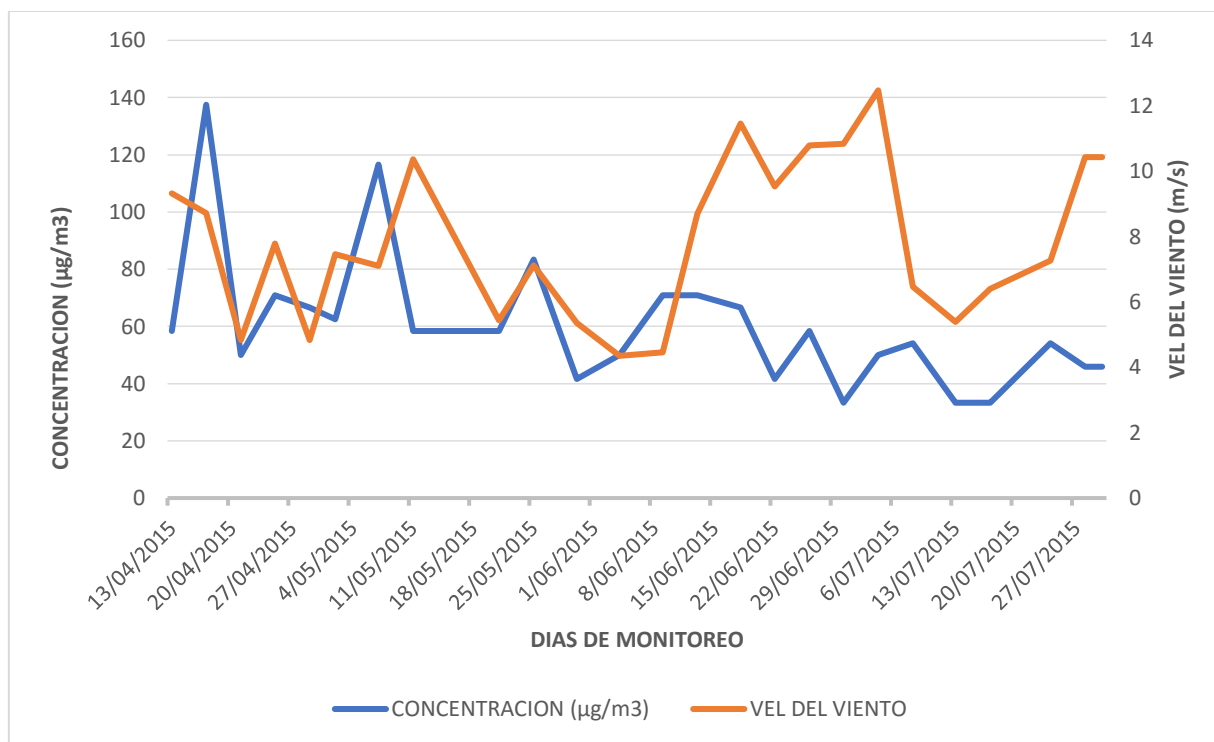


Figura 14. Relación entre concentración de PM_{10} y velocidad del viento, se evidencian las líneas de tendencia que registra el comportamiento entre las dos variables, R Doria & T. Porras, 2017.

Figura 15. Relación de Concentración diaria de PM_{10} en el punto de muestreo en la Universidad de la costa (CUC) con la Dirección del viento abril- Julio 2015. Se muestra el comportamiento de la concentración con respecto a la dirección del viento ya que este factor es muy importante para que las concentraciones de PM_{10} se mantengan dispersas en el aire, el movimiento de las partículas va fijado a la dirección del viento, por medio de esta variable se pueden identificar fuentes fijas aportantes al material particulado (Venegas & Martin, 2014), se evidencio que el viento provenía del noreste que debe ser influenciado por que al Norte de la ciudad se encuentra el Mar caribe y al Este el rio magdalena (Alcaldia de Barranquilla, 2010). (Gómez et al., 2000).

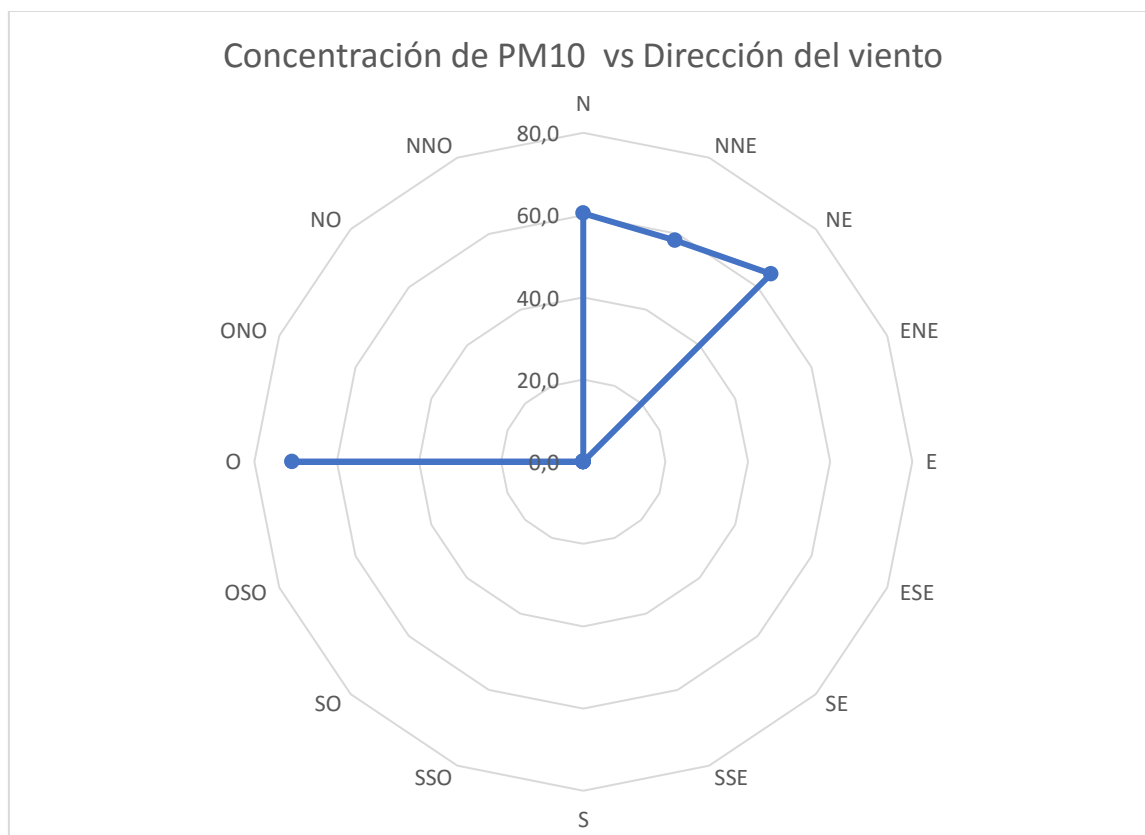


Figura 15. Relación de Concentración diaria de PM₁₀ en el punto de muestreo en la Universidad de la costa (CUC) con la Dirección del viento abril- Julio 2015, R Doria & T. Porras, 2017.

La Figura 16 muestra que los valores de humedad relativa del aire son irregulares ya que mantiene un rango máximo de 87,9% el día 9 de junio y un el mínimo fue de 79% el 11 de mayo. La humedad relativa del aire con respecto a la concentración de PM₁₀ puede influir ya que estas partículas pueden adquirir por medio de la humedad un mayor peso lo que ayuda a que estas sedimenten y las concentraciones de PM₁₀ en el aire sean menores (Figuroa et al., 2009). En el grafico se ve evidenciado este fenómeno ya que es notorio que en los días donde la humedad fue alta las concentraciones de PM₁₀ son bajas debido a que según (J. P. Silva & Canchala, 2013) la humedad influye en la formación de partículas de 10 μ ya que facilita la suspensión sobre el suelo.

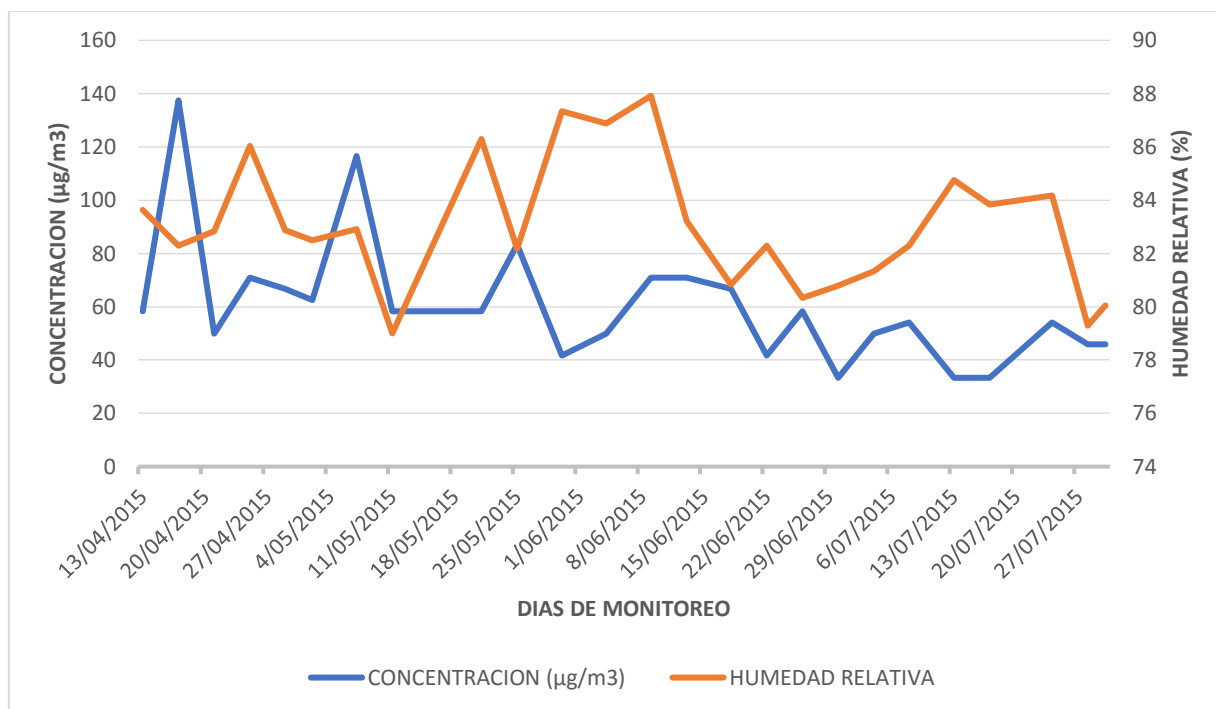


Figura 16 Relación de Concentración diaria de PM_{10} con la Humedad relativa del aire mediante líneas de tendencias, R Doria & T. Porras, 2017.

En el Figura 17 presenta la comparación de la concentración de PM_{10} y la temperatura promedio diaria del aire, esta variable tiene valor máximo de $29,1^{\circ}C$ y se registró una disminución de la concentración a $66,6 \mu g/m^3$ el día 29 de abril y un valor mínimo de $26,8^{\circ}C$ y la concentración aumento $26,2 \mu g/m^3$ el 08 de julio. Es evidente la relación inversa entre este parámetro meteorológico y la concentración de PM_{10} , al observar que el día 17 de abril, cuando se midió la máxima concentración de PM_{10} , se evidencio una de las temperaturas más bajas de todo el periodo de medición ($27,4^{\circ}C$), mientras que el día 17 de julio que se presentó la menor concentración de PM_{10} ($33,3 \mu g/m^3$) se encontró una de las temperaturas más altas ($28,0^{\circ}C$). Existe una influencia de la temperatura en la dispersión del PM_{10} en el aire, ya que el aumento en la temperatura reduce la presencia de líquido en las partículas, reduciendo la masa y la lectura gravimétrica del mismo y aumentando el tiempo de suspensión de las partículas. Al respecto autores como Montoya et al. (2013) describieron que los altos valores PM_{10} son influidos

directamente por la temperatura y los cuales tienen una relación directamente proporcional, adicionalmente Miranda & Ortiz, (2008) señalan que correlación lineal negativa lo cual confirma la relación inversamente proporcional entre la temperatura y la fracción respirable PM_{10} . *Abril-Julio 2015.*

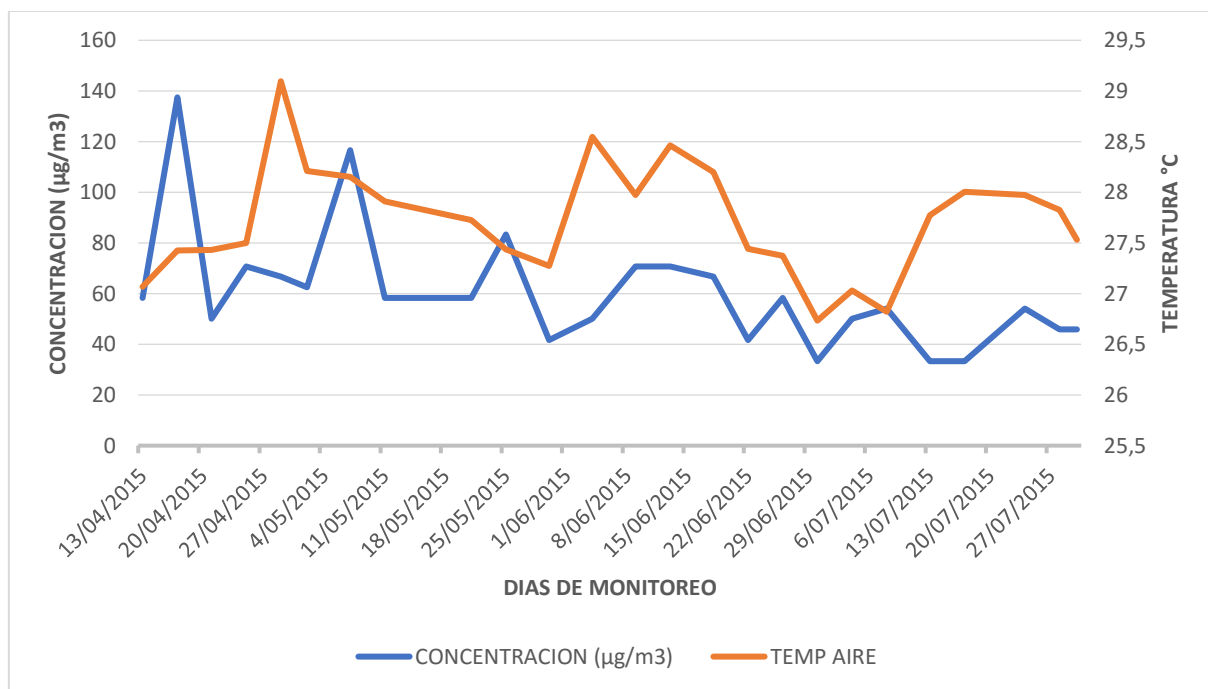


Figura 17 Relación de Concentración diaria de PM_{10} en el punto de muestreo en la Universidad de la costa (CUC) con la Temperatura aire, R Doria & T. Porras, 2017.

La radiación solar tiene relación directa con la estabilidad atmosférica y estos fenómenos a su vez actúan sobre las concentraciones de material particulado PM_{10} debido a su favorecimiento a la acumulación de este contaminante y por ende un aumento de su concentración ya que según (Ochoa & Jiménez, 2010) dice que en las horas de la mañana se presenta una estabilidad atmosférica que es interrumpida por el aumento de la radiación solar y de manera similar se presenta el fenómeno en las horas de la tarde cuando disminuye la radiación se crea la estabilidad atmosférica y en los dos casos la estabilidad favorece a la acumulación del PM_{10} .

Morales,(2012) Señala que en grandes cantidades de material particulado disperso en el aire se presentan atenuaciones en la radiación global ya que el contaminante no permite que esta variable ingrese directamente lo cual ocasiona una disminución. En la figura 18 para el día 8 de julio con valor de 245.1 y la concentración fue de 54.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 13 de julio la concentración disminuye a 33.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la radiación aumenta a 307.5.

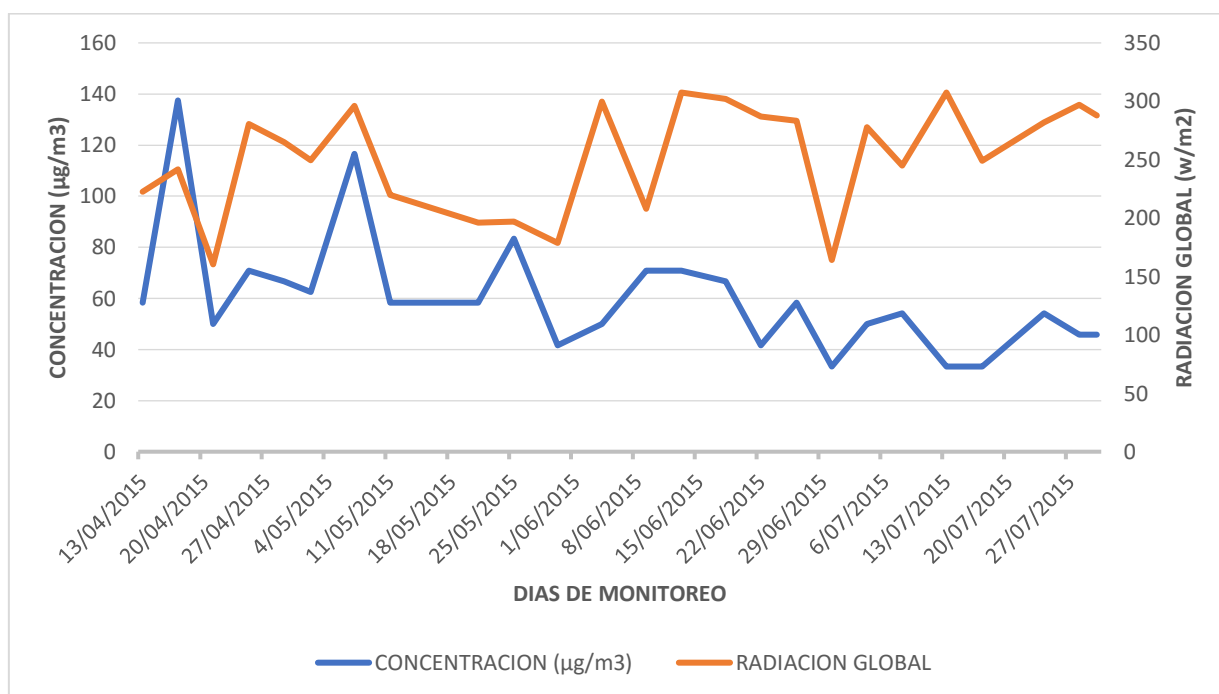


Figura 18. Relación de Concentración diaria de PM_{10} en el punto de muestreo en la Universidad de la costa (CUC) con la Radiación global w/m^2 (Abril – Julio 2015) R Doria & T. Porras, 2017.

7.4.2 Correlación de Spearman.

Debido a que las variables objeto de estudio no se ajustan a una distribución normal, es imposible su tratamiento mediante pruebas paramétricas como la de Pearson. Los autores Bonilla, Rueda, Molano & Robayo, (2015) realizaron un análisis estadístico mediante la correlación de Pearson en el cual no encontraron una relación directa entre nano-partículas y

las variables meteorológicas, los coeficientes de Spearman son menos sensibles a valores aberrantes (outliers) que los coeficientes de Pearson. Por lo tanto, para evaluar la correlación entre las variables meteorológicas y la concentración de material particulado se aplicó dicha correlación con un nivel de significancia del 0,05 %, el mismo comportamiento obtuvieron Autores como García & González, (2008) afirmando que para los datos normalizados se aplicó la correlación de Pearson y para los datos no normalizados aplico spearman.

Tabla 3

Resultados Correlación de Spearman

	Concentración	Dirección del viento	Humedad relativa	Radiación global	Temperatura
Concentración					
Dirección del viento	-0,0686 (0,7477)				
Humedad relativa	-0,1015 (0,6340)	-0,0529 (0,8039)			
Radiación global	-0,0254 (0,9053)	0,0529 (0,8039)	-0,3342 (0,1169)		
Temperatura	-0,2599 (0,2228)	0,0287 (0,8928)	0,2751 (0,1970)	0,1752 (0,4112)	
Velocidad promedio del viento	-0,0450 (0,8327)	0,0197 (0,9263)	-0,1615 (0,4487)	-0,1954 (0,3595)	0,1915 0,3690
(Valor-P)					

Nota: Datos de correlación y los P-Valores obtenidos de la correlación de Spearman de las variables meteorológicas y las concentraciones medidas de Material particulado, R Doria & T. Porras, 2017.

Según lo justificado en la tabla 3 esta prueba no existe una relación lineal entre ninguna de las variables meteorológicas medidas y la concentración de PM_{10} . Debido a que ningún p-valor es inferior a 0,05. Esto no implica que no haya influencia entre las variables meteorológicas y la concentración de material particulado, simplemente, la relación es más compleja. Por lo anterior no es posible establecer un modelo matemático lineal que permita describir la concentración de material particulado en función de las variables meteorológicas como lo indican Ramos, Bautista & Valdez (2010) que debieron explicar mediante un modelo no lineal por que la relación entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas es muy compleja. A demás considerando que la estación esta retirada del punto de muestreo y fue poco el tiempo de muestreo lo que aumenta en margen de error.

7.5 Análisis multivariado

7.5.1 Regresión lineal múltiple.

Los resultados del análisis de regresión entre los valores obtenidos de la concentración de material particulado y las variables meteorológicas como son velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura y radiación global indicaron que a partir del método stepwise, o coeficiente de la variable de temperatura es significativamente diferente de cero con un (p- valor 0,071) con un nivel de significancia del 10% lo cual se ve en el Tabla 4 , lo cual indica que existe una relación entre la fracción respirable y la temperatura (Sierra, 2006) (Opazo, 2009).

Tabla 4

Resultados obtenidos del modelo Stepwise para la ecuación de regresión.

	Coefficiente	Valor -P
Constante	298	
Temperatura máxima diaria (° C)	-8,63	0,071
R²		13,52
R²(aj)		9,76

Nota: Valores del modelo de Stepwise de la variable temperatura, la cual registro la mayor correlación con el material particulado según su P-Valor, también se puede apreciar que la relación se da de forma inversa, R Doria & T. Porras, 2017.

Con base en los resultados del ajuste modelo presentados en la *tabla 4* el coeficiente de correlación R^2 es un indicador de la calidad del ajuste (Arriaza, 2004). Teniendo en cuenta que puede asumir valores entre 0 y 100% e indica el porcentaje de variación en la concentración que fue explicada por su relación con la temperatura. En este caso puede decirse que los resultados presentan un ajuste muy bajo o que la relación entre la concentración de PM_{10} y las variables meteorológicas no es de tipo lineal. Posiblemente sea de una mayor orden y/o corresponda a fenómenos mucho más complejos (García & González, 2008). Es decir, solamente un 13,5% de la variación de la concentración puede ser explicada por la relación con la temperatura máxima diaria al igual que Opazo, (2009) que indica la relación existente entre la temperatura y la concentración de PM_{10} . La ecuación del modelo de regresión, indica que a cada aumento de un (°C) en la temperatura máxima diaria corresponde una disminución de $8.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de material particulado.

$$\text{CONCENTRACION } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 298 - 8.63 \text{ Temperatura máxima diaria } (^\circ \text{C})$$

7.5.2 Análisis de componentes principales.

El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 6 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos (Arriaza, 2004.). Para este caso fue necesario el planteamiento de seis componentes para explicar el 100 % de la variabilidad de los resultados. Sin embargo, solo tres 3 componentes fueron extraídos puesto que tuvieron valores mayores o iguales que 1, para de esta manera obtener el valor y determinar la influencia que tienen estas variables en la concentración de PM_{10} . Como se observa en la Tabla 5 estos tres componentes permiten explicar el 67,7% de la variabilidad de los resultados. El primer componente explica el 25,9 %, el segundo el 23,2 % y el tercero el 18,6 %.

Tabla 5

Componentes principales analizados para las variables meteorológicas en relación a las concentraciones de PM_{10}

Componente numero	Eigenvalor	Porcentaje de varianza	Porcentaje Acumulado
1	1,55374	25,896	25,9
2	1,39258	23,21	49,1
3	1,11881	18,647	67,7
4	0,949922	15,832	83,5
5	0,733429	12,224	95,9
6	0,251525	4,192	100

Nota: Descripción de cada uno de los valores propios de los seis componentes principales, siendo los tres (3) primeros los cuales describen un 67,7 % de la variación de los datos, R Doria & T. Porras, 2017.

En la Tabla 6 se observa el peso de las variables meteorológicas y el material particulado PM₁₀, consideradas como variables de partidas en la conformación de los tres componentes principales. Para el primer componente se observa que la concentración de PM₁₀ presentan una relación directa con el mismo. Mientras que la humedad relativa y la temperatura presentan mayor peso, pero relación inversa. En menor medida aportan a la variabilidad en el primer componente la dirección del viento, la radiación solar y la velocidad del viento.

Tabla 6

Pesos de los componentes en cada variable meteorológica

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Concentración	0,400187	0,342638	0,162576
Dirección del viento	0,340232	0,079303	0,110314
Humedad relativa	-0,540119	0,441847	-0,330521
Radiación global	0,326801	-0,652934	-0,341409
Temperatura	-0,52212	-0,466078	-0,0525851
Velocidad promedio del viento	-0,230122	-0,193725	0,856055

Nota: Valores de los componentes principales que determinan que las variables que tienen influencia en el material particulado son Temperatura, Humedad relativa, Radiación global y Velocidad del viento, R Doria & T. Porras, 2017.

En la Esto es coherente con la correlación encontrada entre la temperatura y la concentración de PM₁₀ en el análisis de correlación lineal múltiple.

Ecuación 2 se describe la relación del primer componente con las variables. Se observa que la concentración, la dirección del viento y la radiación global tienen relación directa con el componente. Mientras que la temperatura y la velocidad del viento tienen una relación inversa. Esto es coherente con la correlación encontrada entre la temperatura y la concentración de PM_{10} en el análisis de correlación lineal múltiple.

Ecuación 2. Relación de los componentes principales

$$C1 = 0,400187 * \text{Concentración} + 0,340232 * \text{Dirección del viento} - 0,540119 * \text{Humedad relativa} + 0,326801 * \text{Radiación global} - 0,52212 * \text{Temperatura} - 0,230122 * \text{Velocidad promedio del viento}.$$

Miranda & Ortiz (2008) Señalan que la correlación significativa para el PM_{10} presenta una correlación lineal negativa con dirección del viento y la temperatura, además mostró una correlación lineal positiva con la precipitación. evidencia relación significativa entre PM_{10} y la precipitación; así como la relación entre la Dirección del viento y la Temperatura. La relación entre PM_{10} y la precipitación es directamente proporcional; en cambio se tiene una relación inversamente proporcional entre la dirección de viento y la temperatura.

8. Conclusiones

En el presente trabajo se evidenció el comportamiento obtenido por el material particulado PM_{10} en el periodo de monitoreo, el cual fue cada 3 días durante los meses de abril, mayo, junio y julio del 2015. El monitoreo se llevó a cabo en los 4 meses buscando la forma de obtener resultados en un periodo seco y húmedo, pero se presentó una situación atípica en la cual no hubo registro de lluvias.

Teniendo en cuenta que la norma ambiental vigente en Colombia registra un valor máximo permisible de $100 \mu g/m^3$ para una media de 24 horas, durante los días de monitoreo se tomaron un total de 25 muestras se registró una concentración en masa de PM_{10} que sobre paso el límite máximo que exige la norma en un 8 %, los valores que sobre pasaron la norma fueron de $137.5 \mu g/m^3$ y $116,6 \mu g/m^3$ para los días 17 de abril y 7 de mayo del 2015 respectivamente, correspondiendo a dos (2) días de los 25 muestreados.

Dentro de este estudio se tuvieron en cuenta las directrices planteadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de la cual se pudo establecer que el 60% de los datos no estarían cumpliendo con la sugerencia estricta por parte de la OMS que pretende reducir las enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica.

La correlación realizada entre la concentración de PM_{10} y las variables meteorológicas se llevó acabo y arrojó que los valores no tuvieron una distribución normal, y mediante los coeficientes de spearman se determinó que la relación entre estas es compleja con un nivel de significancia del 0,05%.

Mediante el análisis de componentes principales el cual fue de gran importancia para reducir la combinación lineal de las 6 variables, se obtuvo una reducción a 3 componentes que daban

explicación al 67,7 %, las variables que tuvieron influencia fueron la humedad relativa y la temperatura ya que estas aportan en mayor medida a la variabilidad de los datos de forma inversa, ya que cuando aumenta estas variables las concentraciones de PM_{10} disminuye y de manera inversa.

La correlación grafica permitió determinar que las variables con más influencia en la fracción respirable fueron velocidad del viento, la humedad y temperatura de forma inversa ya que cuando estas variables presentaron un aumento se evidenció una disminución en la concentración de PM_{10} y de la misma forma si las variables antes mencionadas decrecían el PM_{10} aumentaba, esto se presentó en proporciones diferentes dependiendo la relación directa o indirecta que tuviera la variable con la concentración de PM_{10} .

Mediante la regresión lineal múltiple que evaluó la forma que actúan las variables meteorológicas sobre la concentración del PM_{10} se pudo confirmar la influencia inversa de la temperatura en la fracción respirable arrojando una significancia del 10% según el modelo de Stepwise también se pudo determinar que por cada aumento de un grado $^{\circ}C$ en la temperatura máxima diaria se refleja una disminución de $8.63 \mu g/m^3$ en la concentración de PM_{10} .

Consideraciones Finales

Para mejorar las condiciones ambientales en materia de contaminación atmosférica en la ciudad de barranquilla.

Realizar estudios de monitoreo de calidad de aire frecuentemente para llevar un control en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos.

Ubicar estaciones de monitoreo en la ciudad de Barranquilla, permitiendo la identificación del comportamiento diario de los contaminantes.

Desarrollar estudios donde las estaciones de monitoreo de calidad del aire trabajen conjuntamente con las estaciones meteorológicas existentes en la ciudad de Barranquilla.

Referencias

- (EHU) Euskal Herriko Unibertsitatea. (2016). Función de distribución de Weibull. Retrieved February 21, 2017, from <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/viento/datos/estadistica.html>
- Acevedo, J., Bocarejo, J., & Velásquez, J. (2013). Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia.
- AGRO. (2013). Contaminación atmosférica From <https://www.yumpu.com/es/document/view/yumpu.com/es/document/view/56734567/contatmosf/9>.
- Alcaldía de Barranquilla. (2010). Barranquilla. Retrieved March 2, 2017, from <http://www.barranquilla.gov.co/conoce-a-barranquilla/informacion-general>.
- ALONSO, A. L. (2013). CENTRO HISTORICO DE BARRANQUILLA, COLOMBIA Y SUS TRANSFORMACIONES SOCIO-GEOGRAFICAS (CHB): 1970-2006. *Desarrollo Indoamericano*, 1(120).
- Alvarez, R. (1994). Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS.
- Arciniegas, A., & Rodriguez, C. (2005). Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relacion con la concentracion de particulas en la localidad de puente aranda en bogota.
- Arciniégas, C. (2011). Diagnostico y control de material particulado: particulas suspendidas totales y fracción respirable PM10.
- Arriaza, M. (2004). GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS DE DATOS. Retrieved from http://www.um.es/jmpaz/AGP1213/guia_practica_de_analisis_de_datos.pdf
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 159–175.

- Baró, R. (2013). Caraterización de los eventos extremos de contaminación atmosférica sobre la península Ibérica mediante análisis multivariante de una simulación de calidad de aire-clima.
- Barrios, O. (2007). contaminacion ambiental por material particulado generado en obras civiles. Retrieved April 21, 2017, from <https://www.google.com.co/search?q=contaminacion+ambiental+por+material+particulado+generado+por+obras&oq=contaminacion+ambiental+por+material+particulado+generado+por+obras&aqs=chrome..69i57.18546j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- Bidegain, M., & Diaz, A. (2011). Análisis estadístico de datos climaticos.
- Bonilla, L. (2010). Documento de Trabajo sobre Economía Regional.
- Bonilla, L., Rueda, J., Molano, E., & Robayo, I. (2015). Estudio de Exposición Personal a Nano-Partículas considerando Variables Meteorológicas en Corredores Viales de la Localidad de Chapinero.
- Camacho, A. (2012). Variabilidad de los niveles de PM10 y contaminantes persistentes asociados en ambientes urbanos.
- Caro, D., & Uribe, L. (2008). EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES CONTENIDOS EN MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE Y SU INCIDENCIA SOBRE AMBIENTES INTRA - EXTRA MURALES EN DOS LOCALIDADES DE BOGOTÁ Y OTRAS CIUDADES DEL PAÍS CON ANTECEDENTES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.
- Casella. (2013). Casella Tuff Muestreadores personales. Retrieved from www.casellameasurement.com
- Castañares, R., Figueroa, E., & Méndez, F. (2001). Daños a la salud por contaminación

atmosférica. Retrieved from

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RBuVVl0yTq4C&oi=fnd&pg=PR11&dq=Daños+a+la+salud+por+contaminación+atmosférica:+UAEMEX&ots=GzrnJfxCE9&sig=qXFzjT9ORf4R1SJBZQYLxiznpOk>

CIOH. (2010). Climatología de los principales puertos del caribe colombiano.

Corte, D., Sierra, F., & Valencia, G. (2015). Validación del modelo matemático “Función de densidad de probabilidad (pdf) de Weibull.” *Prospectiva*, 13(2), 38.

<https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.485>

De La Fuente, S. (n.d.). Análisis Factorial. Retrieved from

<http://www.fuenterrebollo.com/Economicas/ECONOMETRIA/MULTIVARIANTE/FACTORIAL/analisis-factorial.pdf>

De la lanza, G., Caceres, C., Adame, salvador, & Hernandez, S. (2010). Diccionario de

hidrología y ciencias afines. Retrieved from

[https://books.google.com.co/books?id=My27250twg0C&pg=PA120&dq=escala+de+beaufort&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiNjJyZ-5HQAhXCbiYKHahID64Q6AEILDAD#v=onepage&q=escala de beaufort&f=false](https://books.google.com.co/books?id=My27250twg0C&pg=PA120&dq=escala+de+beaufort&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiNjJyZ-5HQAhXCbiYKHahID64Q6AEILDAD#v=onepage&q=escala+de+beaufort&f=false)

Diaz, V., & Paez, C. (2011). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras.

Echeverri, C., & Maya, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM 2.5) y respirables PM 10 en la ciudad de Medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 23–42.

Echeverry, B., & Ospina, L. (2009). Evaluación del riesgo en la salud por la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) volátiles en ambientes extramurales y su comparación con ambientes intramurales en las localidades de Puente Aranda, Fontibón y

Kennedy.

Elbayoumi, M., Ramli, N. A., Md Yusof, N. F. F., Yahaya, A. S. Bin, Al Madhoun, W., & Ul-Saufie, A. Z. (2014). Multivariate methods for indoor PM10 and PM2.5 modelling in naturally ventilated schools buildings. *Atmospheric Environment*, 94, 11–21.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.007>

EPA. (2006). Environmental Protection Agency 40 CFR Part 50 National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule. *Federal Register*, 71(200).

Eslava, J. (1993). Climatología y diversidad climática de colombia.

ESTRUC. (2011). Monitoreo atmosférico. Retrieved from

<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2884>

Fernandez, B., & Hernandez, K. (2008). Diagnostico de la industria del cemento en colombia y la evaluacion de alternativas tecnologicas para el cumplimiento de la norma de emision de fuentes fijas.

Fernández, P., & Diaz, P. (2001). Relación entre variables cuantitativas.

Figueroa, A., Garibay, C., & Gutierrez, P. (2009). Aplicación del análisis discriminante a los datos de calidad del aire de la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(2), 58–64.

Fundesarrollo, & Camara de comercio. (2014). Boletin de coyuntura economica de barranquilla.

Galvis, B., & Rojas, N. Y. (2006). Relación entre PM 2,5 y PM 10 en la ciudad de Bogotá, 3(2).

García, F. A., & González, K. (2008). Evaluación de la concentración de iones contenidos en material particulado respirable y su incidencia sobre ambientes intra-extramurales en la localidad de Puente Aranda. *reponame:Repositorio Institucional UNISALLE - RIUS*.

Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14063>

- García R, F. F., Agudelo G, R. A., & Jiménez J, K. M. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 24(2), 73–82.
- Garrillo, E. (2010). Evolución y tendencia espacio -temporal de las concentraciones de material particulado pm10 considerando la influencia de los parámetros meteorológicos.
- Gómez, D. R., Magallanes, J. F., & Reich, S. L. (2000). ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CONCENTRACIONES DE PARTÍCULAS Y NO₂ EMITIDOS EN UNA ACERÍA.
- Gomez, M., Saldarriaga, J., Correa, M., Posada, E., & Castrillon, F. (2008). Modelacion estadistica de los aportes de las vias como fuente de emision a las particulas totales en suspencion segun modelo MCF, zona cento de medellin, antioquia. *DYNA*, 74(153), 35–40.
- Hermelín, M. (2007). Entorno natural de 17 ciudades de Colombia. Retrieved from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=s1kykWt9eQYC&oi=fnd&pg=PA24&dq=Entorno+natural+de+17+ciudades+de+Colombia:+Universidad+Eafit.&ots=oY1_mIqk8T&sig=ZJNJLDk6g5Eb3dFdSZl9sB3NCtc
- Hernandez, A., Bohorques, A., Pinzon, F., Guzman, L., & Yamile, M. (2012). Informe del Estado de la calidad del aire.
- Hernández, A., & Ortega, O. (2013). Análisis estadístico del viento como recurso energético.
- Hernández, L., Téllez, M., Sanín, L., Lacasaña, M., Campos, A., & Romieu, I. (2000). Relacion entre consultas a urgencias por enfermedad respiratoria y contaminacion atmosferica en Ciudad Juarez, Chihuahua. *Salud Publica de Mexico*. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342000000400003>
- Herrera, J., Rodríguez, S., & Solís, L. (2009). Determinación de los niveles de particulas pm10 y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia, Costa Rica: año 2005-2006. *Revista*

Tecnología En Marcha, 22(4), 18.

Herrera Torres, G., & Instituto de Hidrologia, M. y E. A. I. (2005). *Protocolo para la vigilancia y seguimiento del modulo aire del sistema de información ambiental*. IDEAM,.

Husain, L., Alvi, S., & Dutkiewicz, V. A. (2009). Black Carbon Aerosols in Urban Air in South Asia.

IDEAM. (2016). Informe del estado de la calidad del aire en colombia 2011 - 2015.

Junco, J. (2016). Material Particulado PTS, 10 y 2.5 micras. Retrieved from

<http://www.monitoreoambiental.com/material-particulado-pts-10-y-2-5-micras/>

Manahan, S. (2007). Introducción a la química ambiental. Retrieved from

[https://books.google.com.co/books?id=5NR8Dik1n68C&pg=PA401&dq=contaminantes+atmosféricos&hl=es-](https://books.google.com.co/books?id=5NR8Dik1n68C&pg=PA401&dq=contaminantes+atmosféricos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiK3v_K7bnPAhUErD4KHVKCCGMQ6AEIKTAB#v=onepage&q&f=true)

[419&sa=X&ved=0ahUKEwiK3v_K7bnPAhUErD4KHVKCCGMQ6AEIKTAB#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.co/books?id=5NR8Dik1n68C&pg=PA401&dq=contaminantes+atmosféricos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiK3v_K7bnPAhUErD4KHVKCCGMQ6AEIKTAB#v=onepage&q&f=true)

Martelo, M. (1998). EL FENOMENO DE EL NIÑO, 48–55.

Martinez, E., & Diaz, Y. (2004). Contaminación Atmosférica. Retrieved from

[https://books.google.es/books?id=sLE8xbtcK-](https://books.google.es/books?id=sLE8xbtcK-gC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

[gC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?id=sLE8xbtcK-gC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Mavdt. (2010). Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

MAVDT. (2008). Protocolo para el monitreo y seguimiento de la calidad de aire.

MAVDT. (2010a). MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.

MAVDT. (2010b). Resolucion 610 del 2010.

- Meisel, A., & Perez, G. (2006). Geografía física y poblamiento en la Costa Caribe colombiana.
- Mejia, D. M. (2007). El fenómeno de El Niño y su posible impacto en Colombia.
- MinAmbiente. (2012). Diagnostico nacional de salud ambiental.
- Miranda, K., & Ortiz, L. (2008). Evaluación de la concentración de material particulado suspendido pm10 y su relación con la morbilidad asociados aers en niños menores a catorce años por enfermedad respiratoria aguda en el municipio de toluviejo (sucre).
- Montoya, M., Zapata, P., & Correa, M. (2013). Contaminación ambiental por PM10 dentro y fuera del domicilio y capacidad respiratoria en Puerto Nare, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 15(1), 103–115. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/38466>
- Morales, L. (2012). Variabilidad espacial y temporal del material particulado en aire ambiente en la zona carbonífera del departamento del cesar y su interrelación con la meteorología. Retrieved February 8, 2017, from https://www.google.com.co/search?q=variabilidad+espacial+y+temporal+de+material+particulado&rlz=1C1CHZL_esCO684CO684&oq=variabilidad+espacial+y+temporal+de+material+particulado&aqs=chrome..69i57j0l5.14833j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- Mues, A., Manders, A., Schaap, M., Kerschbaumer, A., Stern, R., & Builtjes, P. (2012). Impact of the extreme meteorological conditions during the summer 2003 in Europe on particulate matter concentrations. *Atmospheric Environment*, 55, 377–391. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.002>
- Novoa, J., Parra, D., Quijano, S., Orrego, D., & Becerra, M. (2014). Análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos caso de estudio. *QUID: Investigación, Ciencia Y*

Tecnología, (23), 13–20.

O’Ryan, R., Larraguibel, L., O’Ryan, R., & Larraguibel, L. (2000). Contaminación del aire en Santiago: Estado actual y soluciones.

Ochoa, A., & Jiménez, J. F. (2010). Ciclo diurno de PM10 en el Valle de Aburra. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/4108/1/Ciclo_diurno_de_PM10_en_el_Valle_de_Aburra.pdf

OMS. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Retrieved from http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf

OMS. (2014). Calidad del aire (exterior) y salud. *WHO*, 1(1), 15. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

OMS. (2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. *WHO*. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Opazo, D. (2009). Distribución espacial de la contaminación por material particulado y su relación con las temperaturas del aire y los vientos de Santiago para el año 2009.

Park, J.-M., Rock, J. C., Wang, L., Seo, Y.-C., Bhatnagar, A., & Kim, S. (2009). Performance evaluation of six different aerosol samplers in a particulate matter generation chamber. *Atmospheric Environment*, 43(2), 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.028>

Puigcerver, M., & Carrascal, D. (2012). Medio atmosférico, El. Meteorología y contaminación. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=cPYrHVmsIewC&pg=PA47&dq=contaminantes+atmosféricos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiK3v_K7bnPAhUErD4KHVKCCGMQ6AEIIzAA#v=onepage

&q&f=false

- Ramírez, C., Ortégón, A., Acevedo, J., Bocarejo, J., Velásquez, J., & Pedroza, A. (2013). Marco Teórico de contaminación atmosférica en Colombia.
- Ramos, S., Bautista, R., & Valdez, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México, 26(1), 65–80. Retrieved from www.ujat.mx/publicaciones/uciencia
- Rangel, M. (2015). Ciencias Naturales. Retrieved from <http://naturalesceuja2015.blogspot.com.co/2015/10/que-tanto-aire-respiramos.html>
- Rius, J., Gómez, E. T., Sanfeliú, T., & Hernández, D. (2001). Caracterización granulométrica y mineralógica de la materia particulada atmosférica en el área cerámica de Castellón. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
- Rodríguez, V. (2003). Material particulado atmosférico en el Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias.
- Rojo, J. (2007). Regresión lineal múltiple.
- Romero, M., Bermejo, P., Lacasaña, M., Téllez, M., Aguilar, J., & Romieu, I. (2004). Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana, 46(3).
- Ruiz, E., Cillero, D., P, M., Morales, A., San Vicente, G., de Diego, G., & Sanchez, J. M. (2014). Informes Técnicos Ciemat.
- Sahu, S., Gelfand, A., Holland, D., & Mardia, K. (2004). Spatio-temporal modeling of fine particulate matter.
- Saldarriaga, J., Echeverri, C., & Molina, F. (2004). Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM 10) en el Valle de Aburrá, Colombia, 7–16.

- Salguero, J. (2016). Determinación de la concentración de material particulado en la avenida Rodolfo Baquerizo Nanzur, entre las etapas III, IV, V, VII, VIII, IX de la ciudadela la alborada, de la ciudad de guayaquil.
- Sbarato, V., Sbarato, dario, Manzo, P., Basan, R., Ortega, J., Salort, M., & Campos, M. (2000). Análisis y Caracterización del Material Particulado Atmosférico.
- Sierra, M. (2006). Establecer la asociacion existente entre las variables meteorologicas temperatura, velocidad del viento y precipitacion y las concentraciones de PM10 registrados en la red de calidad de aire de Bogota D.C.
- Silva, J. P., & Canchala, T. (2013). Variación espacial y temporal de concentraciones PM10 en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia. Retrieved March 2, 2017, from <http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/12/q.htm>
- Silva, N. (1995). Cuantificacion de partículas suspendidas, sedimentables y totales de arena de moldeo en el area de produccion de una empresa metal mecanica. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/7568/1/1020112549.PDF>
- Silva, V. (2010). Contaminacion del aire por material particulado (PM 10 y PM 2.5).
- Sokhi, Ranjeet, S., O'Connor, T. C., McManus, B., & Lee, M. (1998). Urban Air Quality: Monitoring and Modelling. In *Urban Air Quality: Monitoring and Modelling* (pp. 3–18). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5127-6_1
- Soto, A., Ortiz, M., & Bithorn, H. (2015). RELACIÓN ENTRE LA INCIDENCIA DE CONJUNTIVITIS ALÉRGICA Y EL MATERIAL PARTICULADO.
- Tiwari, S., Bisht, D. S., Srivastava, A. K., Pipal, A. S., Taneja, A., Srivastava, M. K., & Attri, S. D. (2014). Variability in atmospheric particulates and meteorological effects on their mass concentrations over Delhi, India. *Atmospheric Research*, 145, 45–56.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.027>

Unad. (2013). Tipos de contaminantes y fuentes de emisión. Retrieved from

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358008/Contenido_en_linea_Control/leccin_2_tipos_de_contaminantes_y_fuentes_de_emisin.html

Universidad industrial de santander. (2009). Informe de operación de la red de calidad de calidad de aire en la zona minera del departamento del cesar. Retrieved from

http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/2-8-2010-2-18-48-46-1-1Informe_Mayo_2009.pdf

UValencia. (2010). SPSS: Pruebas no parametricas Kolmogorov Smirnov.

Vargas, C. (2011). Efectos de la fracción gruesa (PM 10-2.5) del material particulado sobre la salud humana.

Venegas, L., & Martin, P. (2014). Concentracion de material particulado en aire en la ciudad de buenos aires.

Vincent, J. H. (2007). *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470060230>

World Health Organization, & Regional Office for & World Health. (2014). Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.

Yadav, P. R. (2009). *Environmental air pollution*. Discovery Pub. House Pvt. Ltd.

Anexo 1

Tabla 1

Bases de cálculos de todo el tiempo de monitoreo comprendido desde el día 13 de mayo del año 2015 hasta el día 08 de junio del 2015, en el cual se encuentran cada una de las concentraciones de los diferentes días de muestreo.

Tabla 1

Bases de cálculos

Fecha	FILTROS			DATOS EQUIPO			CONCENTRACION (µg/m3)
	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferencia (g)	Q (m3/min)	Tiempo de muestreo (Min)	P (µg)	
13/04/2015	0,1503	0,1517	0,0014	0,02	1440	1400	58,3
17/04/2015	0,1502	0,1535	0,0033	0,02	1440	3300	137,5
21/04/2015	0,1490	0,1502	0,0012	0,02	1440	1200	50
25/04/2015	0,1519	0,1536	0,0017	0,02	1440	1700	70,8
29/04/2015	0,1533	0,1549	0,0016	0,02	1440	1600	66,7
2/05/2015	0,1534	0,1549	0,0015	0,02	1440	1500	62,5
7/05/2015	0,1476	0,1504	0,0028	0,02	1440	2800	116,6
11/05/2015	0,1523	0,1537	0,0014	0,02	1440	1400	58,3
21/05/2015	0,1504	0,1518	0,0014	0,02	1440	1400	58,3
25/05/2015	0,1472	0,1492	0,002	0,02	1440	2000	83,3
30/05/2015	0,1485	0,1495	0,001	0,02	1440	1000	41,7
04/06/058	0,1485	0,1497	0,0012	0,02	1440	1200	50
9/06/2015	0,1488	0,1505	0,0017	0,02	1440	1700	70,8
13/06/2015	0,1532	0,1549	0,0017	0,02	1440	1700	70,8
18/06/2015	0,1484	0,15	0,0016	0,02	1440	1600	66,7
22/06/2015	0,1483	0,1493	0,001	0,02	1440	1000	41,7
26/06/2015	0,1527	0,1541	0,0014	0,02	1440	1400	58,3
30/06/2015	0,1505	0,1513	0,0008	0,02	1440	800	33,3
4/07/2015	0,1489	0,1501	0,0012	0,02	1440	1200	50
8/07/2015	0,1481	0,1494	0,0013	0,02	1440	1300	54,2
13/07/2015	0,1481	0,1489	0,0008	0,02	1440	800	33,3
17/07/2015	0,1475	0,1483	0,0008	0,02	1440	800	33,3
24/07/2015	0,1523	0,1536	0,0013	0,02	1440	1300	54,2
28/07/2015	0,1539	0,1550	0,0011	0,02	1440	1100	45,8
30/07/2015	0,1470	0,1481	0,0011	0,02	1440	1100	45,8

Nota: Es la base de cálculo que contiene el resumen de los pesajes iniciales y finales de los filtros con sus respectivos días y concentraciones.